

Grado en Ingeniería Mecánica
2016/2017

Trabajo fin de grado

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS EN PLACAS DE TIPO LAMINADO CON AGUJEROS

María Aransáez Ortega

Tutor

Enrique Barbero Pozuelo

Leganés, septiembre de 2017



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons
Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada

Índice general

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Objetivos | 2 |
| 1.3. Descripción de la memoria | 3 |
| 2. Antecedentes | 5 |
| 3. Modelización | 11 |
| 3.1. Problema de estudio | 11 |
| 3.2. Descripción del proceso de modelización | 13 |
| 4. Post-proceso par la obtención de resultados | 17 |
| 4.1. Rigidez en el plano en dirección de carga | 17 |
| 4.2. Concentración de tensiones | 18 |
| 5. Verificación de la modelización | 23 |
| 5.1. Comprobación de placa con un agujero | 23 |
| 5.2. Comprobación de placa con varios agujeros | 31 |
| 5.2.1. Análisis de la comprobación de placa con varios agujeros . . | 34 |
| 6. Influencia de la variación de la secuencia de apilamiento | 37 |
| 7. Influencia de la variación de las propiedades | 41 |
| 7.1. Variación de materiales | 41 |
| 7.2. Variación de E_1 , E_2 y G_{12} | 44 |
| 7.2.1. Variación de E_1 | 45 |
| 7.2.2. Variación de E_2 | 47 |
| 7.2.3. Variación de G_{12} | 49 |
| 8. Influencia de la variación en laminados unidireccionales | 53 |
| 8.1. Variación de E_1 para apilamiento 0° | 53 |
| 8.2. Variación de E_2 para apilamiento 90° | 56 |
| 9. Influencia de la variación orientación | 61 |
| 10. Influencia de la variación del tamaño de agujero | 67 |

| | |
|--|-----------|
| 11.Presupuesto | 79 |
| 11.1. Datos | 79 |
| 11.2. Descripción del proyecto | 79 |
| 11.3. Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros): | 79 |
| 11.4. Desglose presupuestario (costes directos) | 80 |
| 11.5. Resumen de costes | 81 |
| 12.Conclusión y trabajos futuros | 83 |
| 12.1. Resumen y conclusiones | 83 |
| 12.2. Trabajos futuros | 84 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 2.1. Productos fabricados en material compuesto | 5 |
| 2.2. Fisura inducida por agujero[10] | 7 |
| 2.3. Tensión a lo largo del eje transversal al de aplicación de carga a partir del borde de un agujero[14] | 8 |
| 2.4. <i>Microbuckling</i> o micro-pandeo y <i>Kink band</i> o banda de curvatura [17] | 9 |
| 2.5. Pruebas de resistencia en alas de un avión[21] | 10 |
| 3.1. Modelo base de la placa de estudio | 11 |
| 3.2. Variaciones del modelo base | 12 |
| 3.3. Variaciones del modelo base | 13 |
| 3.4. Módulo <i>Create Part</i> | 13 |
| 3.5. Módulo <i>Property</i> | 14 |
| 3.6. Módulo <i>Step</i> , Comando <i>Edit Field output request</i> | 15 |
| 3.7. Módulo <i>Load</i> | 16 |
| 3.8. Módulo <i>Mesh</i> | 16 |
| 4.1. Módulo <i>Visualization</i> , tensiones | 19 |
| 4.2. Módulo <i>Visualization</i> , Comando <i>Result: Section point</i> | 20 |
| 4.3. Módulo <i>Visualization</i> , comando <i>Contour plot options</i> | 20 |
| 4.4. Módulo <i>Visualization</i> , Comando <i>XY data manager</i> | 21 |
| 4.5. Módulo <i>Visualization</i> , Comandos <i>XY</i> | 21 |
| 4.6. Orientación de capas | 22 |
| 5.1. Lámina con agujero sometida a tensión[6] | 24 |
| 5.2. Apilamiento del laminado: $[45/0/-45/90]_{2s}$ | 26 |
| 5.3. Diseño de placa | 28 |
| 5.4. Condiciones de placa | 29 |
| 5.5. KT frente a distancia en x | 30 |
| 5.6. Configuraciones del artículo [1] | 31 |
| 5.7. Concentración de tensiones frente a las diferentes configuraciones | 33 |
| 5.8. Concentración de tensiones frente a las diferentes configuraciones según el artículo | 34 |
| 5.9. Rigidez en el plano en dirección de la carga para las diferentes configuraciones (GPa) | 36 |
| 6.1. Apilamiento del laminado: $[45/0/-45/90]_{2s}$ | 37 |

| | |
|--|----|
| 6.2. Laminados con diferentes secuencias de apilamiento. | 38 |
| 6.3. Configuraciones 1H, 2HL, 2HT y 2HD | 39 |
| 7.1. Concentración de tensiones para diferentes materiales | 43 |
| 7.2. Rigidez en el plano en dirección de la carga para diferentes materiales | 44 |
| 7.3. Concentración de tensiones para los diferentes valores de E_1 | 45 |
| 7.4. Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de E_1 | 46 |
| 7.5. Concentración de tensiones para los diferentes valores de E_2 | 47 |
| 7.6. Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de E_2 | 48 |
| 7.7. Concentración de tensiones para los diferentes valores de G_{12} | 49 |
| 7.8. Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de G_{12} | 50 |
| 8.1. Apilamiento de la lamina | 54 |
| 8.2. Variación de la concentración de tensiones para un apilamiento unidireccional a 0° | 55 |
| 8.3. Variación de la rigidez en el plano en dirección de la carga para un apilamiento unidireccional a 0° | 56 |
| 8.4. Apilamiento de la lamina | 57 |
| 8.5. Variación de la concentración de tensiones para un apilamiento unidireccional a 90° | 58 |
| 8.6. Variación de la rigidez en el plano en dirección de la carga para un apilamiento unidireccional a 90° | 59 |
| 9.1. Laminados con diferentes orientaciones de capa | 61 |
| 9.2. Laminados con diferentes orientaciones de capa | 62 |
| 9.3. Concentración de tensiones para los diferentes laminados | 63 |
| 9.4. Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes laminados | 64 |
| 10.1. Placas dos agujeros en dirección diagonal, diferentes tamaños de agujero | 68 |
| 10.2. Placas dos agujeros en dirección diagonal, diferentes tamaños de agujero | 69 |
| 10.3. Placas dos agujeros en dirección longitudinal, diferentes tamaños de agujero | 69 |
| 10.4. Placas dos agujeros en dirección longitudinal, diferentes tamaños de agujero | 70 |
| 10.5. Placas dos agujeros en dirección longitudinal, diferentes tamaños de agujero | 71 |
| 10.6. Placas dos agujeros en dirección longitudinal, diferentes tamaños de agujero | 72 |
| 10.7. Concentración de tensiones para las diferentes configuraciones . . . | 73 |
| 10.8. Concentración de tensiones para el coeficiente $D_{grande}/D_{pequeño}$. . | 75 |
| 10.9. Rigidez en el plano en dirección de la carga para las diferentes configuraciones | 76 |

| | |
|--|----|
| 10.10 Rigidez en el plano en dirección de la carga para las diferentes configuraciones | 77 |
|--|----|

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| 5.1. Propiedades del material Carbon/Epoxy | 26 |
| 5.2. Valores de KT según el método Lekhnitskii | 27 |
| 5.3. Caso 1 , tamaño de elemento alrededor del agujero de 0,00004 m, con un número de elementos total de 66084 | 29 |
| 5.4. Verificación del método de modelización | 30 |
| 5.5. Variación de la variable KT a lo largo del eje X | 30 |
| 5.6. Número de elementos totales del mallado | 32 |
| 5.7. Concentración de tensiones obtenidas con la simulación de Abaqus . | 32 |
| 5.8. Concentración de tensiones del artículo [1] | 33 |
| 5.9. Rigidez en el plano en dirección de la carga frente a a/D (GPa) . . | 35 |
| 6.1. Concentración de tensiones y rigidez en el plano en dirección del eje de carga para los 5 laminados | 40 |
| 7.1. Propiedades del material Carbono/Epoxi[1] | 42 |
| 7.2. Propiedades del material B(4)/N5505[24] | 42 |
| 7.3. Propiedades del material Kevlar 49/Epoxi[24] | 42 |
| 7.4. Concentración de tensiones para diferentes materiales | 42 |
| 7.5. Rigidez en el plano en dirección de la carga para diferentes materiales (GPa) | 43 |
| 7.6. Concentración de tensiones para los diferentes valores de E_1 | 45 |
| 7.7. Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de E_1 (GPa) | 46 |
| 7.8. Concentración de tensiones para los diferentes valores de E_2 | 47 |
| 7.9. Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de E_2 (GPa) | 48 |
| 7.10. Concentración de tensiones para los diferentes valores de G_{12} | 49 |
| 7.11. Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de G_{12} (GPa) | 50 |
| 8.1. Concentración de tensiones para los diferentes valores de E_1 en laminado unidireccional | 54 |
| 8.2. Rigidez en el plano en dirección de la carga para diferentes valores de E_1 en laminado unidireccional(0°) | 55 |

| | |
|---|----|
| 8.3. Concentración de tensiones para los diferentes valores de E_2 en laminado unidireccional | 57 |
| 8.4. Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de E_2 en laminado unidireccional | 58 |
| 9.1. Concentración de tensiones para los diferentes laminados | 62 |
| 9.2. Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes laminados | 64 |
| 10.1. Número de elementos para las diferentes configuraciones | 72 |
| 10.2. Concentración de tensiones para las diferentes configuraciones | 73 |
| 10.3. Rigidez en el plano en dirección de la carga para las diferentes configuraciones (GPa) | 75 |
| 11.1. Personal | 80 |
| 11.2. Equipos | 80 |
| 11.3. Resumen de costes | 81 |

Introducción

1.1. Motivación

Hoy en día, los materiales compuestos son el sustituto ideal para las aleaciones de metales ligeros tan usadas[1]. Las industrias usan los materiales compuestos con diferentes fines. Por ejemplo, la industria aeroespacial que tiene como principal objetivo aligerar el máximo posible el peso estructural de las aeronaves. Otro ejemplo son los satélites, en su fabricación materiales, que sufran la menor deformación posible, ya que milímetros de deformación en el espacio suponen kilómetros de desviación en la Tierra. Además, otras industrias, como la automovilística y deportiva, entre otras, los utilizan también.

A pesar de la importancia que estos materiales han alcanzando, durante los tres primeros años de carrera, este tipo de materiales no formaron parte de los temarios de ninguna asignaturas, a pesar de cursar asignaturas relacionadas con materiales. Hasta cuarto de carrera no he tenido ocasión de aprender acerca de ellos. Mi contacto con los materiales compuesto se inició a finales de enero del 2017 durante mis prácticas curriculares y la asignatura optativa *Estructuras ligeras*.

La asignatura me proporcionó conocimientos teóricos sobre materiales compuestos. Estos compuestos tienen una composición diferente a los metales y por ello las leyes y fórmulas que se usan para predecir su comportamiento difieren de los que previamente había estudiado.

La oportunidad recibida de realizar las prácticas como becario en la fábrica de Airbus, en Getafe, me proporcionó la visión industrial de los materiales compuestos, al pertenecer al departamento *Calidad de materiales compuestos*. En la fábrica puede ver como se manipulan y procesan las telas de material compuesto hasta alcanzar una estructura o una parte de ella. Al igual, que en el ámbito teórico los procesos a los que son sometidos, para darles forma son totalmente diferentes a un metal. Estos materiales no pueden ser fundidos o moldeados, tampoco es viable conseguir su forma por desbaste o lijado. Por otro lado a la hora de unir piezas o partes de una no pueden ser soldados, así la manera más típica de unir las es mediante la utilización de remaches o adhesivos. Ver como se materializa y

posteriormente se analizan las estructuras realizadas en material compuesto acabó de despertar mi curiosidad y interés en ellos.

Durante los años sesenta del siglo pasado, los materiales compuestos comenzaron a coger fuerza como futuros sustitutos de los materiales típicos usados en la ingeniería y hasta el momento por las industrias. Las estructuras realizadas en estos nuevos materiales albergaban muchas ventajas, pero también contaban con unas cuantas desventajas, surgidas por su corta vida. Una de las principales desventajas es la incógnita sobre la respuesta de estos materiales ante cargas multidireccionales o cuando en su diseño es necesario introducir discontinuidades.

Por eso el tema de las placas de tipo laminado, se seleccionó para este proyecto. Ya que este tipo de placas son parte de millones de estructuras, como la piel de los fuselajes de los aviones más modernos y sofisticados. Además, se le añadió el condicionante de los agujeros, debido a la necesidad existente de unir o reparar estas piezas. Para la unión de piezas realizadas en material compuesto tienen que ser remachadas, atornilladas o mediante el uso de adhesivos. Así mismo, la reparación de piezas parcheando con otra segunda placa deben de ser remachadas. Y todo aquello que se va a ser remachado o atornillado, previamente ha tenido que ser perforado.

Otro motivo encontrado para sustentar la condición de los agujeros, es la existencia de discontinuidades realizadas de manera incorrecta. Cualquier elemento realizado en material compuesto suelen tener un coste muy alto. Es por esto, que cuando por error se realiza un agujero en la posición equivocada, antes de rechazar y deshacerse de la placa se prueba a realizar el agujero en la posición correcta. Para validar la nueva situación con dos agujeros, hay que realizar un análisis de la interacción que existen entre ambos. Esto se debe a que los agujeros introducen un aumento en la concentración de tensiones en su borde y ello puede llevar a roturas radiales del material, así mismo la placa ve delimitada su rigidez.

Finalmente, la ayuda del tutor Enrique Barbero, me sirvió para concretar y encauzar el proyecto, hacia el estudio de placas de tipo laminado con uno o dos agujeros.

1.2. Objetivos

Este proyecto tiene como objetivo global analizar los fenómenos que ocurren en una placa de tipo laminado en la que existe uno o varios agujeros cuando se encuentran sometidas a cargas en el plano. De todas las variables que dan información sobre los efectos de este tipo de discontinuidades en la placa, este proyecto se va a centrar en el estudio del factor de concentración de tensiones y en la rigidez en el plano en dirección de la carga.

Para conseguir el objetivo principal, se han definido una serie de objetivos secundarios.

Los siguientes objetivos secundarios corresponden a aquellos que están más relacionados con adquirir las capacidades necesarias para conseguir desarrollar y llevar a cabo el proyecto en sí.

- El primer objetivo a lograr es de aprendizaje, en relación a la utilización de un código numérico que emplea el Método de los elementos finitos. Para poder modelizar el problema bajo este modelo numérico es necesario aprender y familiarizarse con el programa Abaqus que es el que va a ser utilizado en este proyecto.
- El segundo objetivo es desarrollar un modelo que permita estimar el factor de concentración de tensiones (KT) y en la rigidez en el plano en dirección de la carga (E_{carga}^p) de la placa con varios agujeros, validando los resultados obtenidos con datos de la literatura científica.
- El último objetivo de aprendizaje, es conseguir desenvolverse con el programa L^AT_EX.

Por otro lado, para alcanzar el objetivo global, una serie de variaciones sobre el problema base son necesarios de llevar a cabo. Las variaciones se van a realizar sobre las propiedades del material y sobre la geometría de la placa.

Los efectos que las variaciones del material producen se van a estudiar modificando:

- La secuencia de apilamiento.
- La orientación de las capas del laminado.
- Los valores de las propiedades del material a través de la modificación de las constantes E_1 , E_2 o G_{12} .
- El material de composición.

Asimismo, los efectos de la geometría de la placa se estudian a través de:

- La variación de la distancia entre los centros de los agujeros.
- La posición relativa entre los centros de agujero.
- La variación del tamaño de los agujeros.

1.3. Descripción de la memoria

La memoria se desarrolla en cuatro partes principales, una introductoria, una explicación de la modelización y su verificación, el estudio y análisis de varios casos, un presupuesto y finalmente una parte conclusiva.

La parte introductoria es en la que nos encontramos, en ella se recoge la motivación detrás de la realización del trabajado, seguido de un *Abstract* donde se recogen los objetivos del proyecto. A continuación se encuentra el punto en el que se encuentra leyendo y para finalizar está una relación de antecedentes que versan sobre el tema tratado en el proyecto.

La segunda parte contiene la descripción del modelado a través del programa informático Abaqus 6.14. Así como dos formas de verificar los pasos y la modelización de las placas de los casos en el software. Esta verificación se lleva a cabo mediante el método analítico de Lehnitskii y a través de la reproducción del artículo *Reproducción del estudio del artículo Progressive failure analysis of CFRP laminate with interacting holes under compressive loading [1]*.

La parte central del trabajo es a su vez la parte principal de él. Esta recoge los casos realizados, en ellos se varían diferentes parámetros del ámbito geométrico y de propiedades del material para ver como repercuten a la concentración de tensiones y la variable denominada *Rigidez en el plano en dirección de la carga*, tras haber sido las elegidas como parámetros de estudio en trabajo.

A continuación se presenta un pequeño presupuesto del proyecto.

Y finalmente se encuentra un resumen con las conclusiones obtenidas y una relación de trabajos futuros. Siendo estos futuros casos que complementarían y ampliarían el proyecto realizado aquí.

Antecedentes

Los materiales compuestos están a la orden del día en aquellas industrias que buscan materiales con alta rigidez y resistencia, pero que su vez el peso que tengan sea mínimo posible[2]. Principalmente los materiales compuestos están implantados y ya son muy usados en la industria aeroespacial. Uno de los casos más famosos es el avión A350 XWB de la compañía Airbus, el cual cuenta con gran parte de su estructura realizada en este tipo de materiales, se puede ver en la figura 2.1a. Otras industria que utilizan los materiales compuestos son la industria del automóvil y la industria naval. Aunque, en los últimos años, la industria del deporte ha puesto en uso materiales compuestos en los equipamientos deportivos de alta gama, buscando que estos tengan un alto rendimiento. Un ejemplo de este uso son las bicicletas de fibra de carbono[3], uno de estos modelos es el de la figura 2.1b.



(a) A350 XWB [4]



(b) Bicicleta CUBE Agree C:62 de Fibra de Carbono[3]

Figura 2.1: Productos fabricados en material compuesto

Los materiales compuesto y en concreto en formato en laminas, son muy usados en la industria aeroespacial y en menor mediad en la industria automovilística[5]. Debido a que los materiales compuestos de fibras largas, como las fibras de carbono en matrices de Epoxi, presentan a los ingenieros de diseño la oportunidad de usar un material con altas cualidades, como rigidez y resistencia, combinados con unas densidades muy bajas[5].

Además, los materiales compuestos albergan un gran número de ventajas frente a los metales o otros materiales más usados, ya que presentan una rigidez y

resistencias mecánica y térmica muy altas, para pesos muy bajos. A pesar de ello, también cuentan con algunas desventajas debido a su corta vida, en comparación a los metales, los cuales se usan desde la Edad de los Metales. Esto produce que a día de hoy, sigan existiendo y realizándose estudios de todo tipo sobre su comportamiento ante diferentes situaciones o condiciones. A su vez, hay estudios motivados por la industria, ya que estas busca métodos precisos y exactos, a la vez de rápidos, basados en fundamentos físicos que predigan la rigidez de los materiales compuestos y la concentración de tensiones[6].

Uno de los motivos por lo que existen investigaciones que tienen como objetivo entender el comportamiento de rotura y los mecanismos de daño, es el incremento del uso de materiales compuestos en muchas aplicaciones ingenieriles. Generalmente el proceso de rotura en este tipo de materiales es compleja en comparación con otros materiales ingenieriles. Ya que la rotura en materiales compuestos es fuertemente dependiente del orden del laminado, la orientación de las laminas del apilamiento y de las relaciones constitutivas. Además, el daño puede darse por rotura de las fibras, la cohesión entre fibras, delaminaciones, la formación de micro-fisuras en la matriz y otros modelos de micro-fallos[7].

La discontinuidad en materiales compuestos es otro tema frecuente de estudio, por sus implicaciones. Típicamente los componentes estructurales cuentan con un número alto de agujeros, introducidos de manera predeterminada, para tener acceso a componentes secundarios o para unir piezas, o por otro lado, agujeros no intencionados causados por errores o daños[5]. Todo esto hace que sea uno de los temas más importantes de estudio. Además la presencia de agujeros o aperturas en las estructuras o placas tiene como consecuencia directa y principal la disminución de la resistencia de la pieza, si se compara con otra pieza idéntica que no cuenta con las discontinuidades[2]. Se ha visto que la resistencia en zonas con muescas o discontinuidades se trata de una de los principales determinantes en el diseño de estructuras realizadas en material compuesto[8]. Dos de los muchos artículos científicos que tratan este tema son *Progressive failure analysis of CFRP laminate with interacting holes under compressive loading*[1] o el artículo *A finite fracture mechanics model for the prediction of the open-hole strength of composite laminates*[6], ambos publicados en medios especializados en el área de materiales compuestos.

Otros estudios ha evaluado la influencia de parámetros geométricos y de materiales en los mecanismos de rotura y resistencia[9]. Además, el fallo de láminas por agrietamiento de matriz, usualmente está inducida por la propagación de grietas y delaminaciones, tangenciales a los agujeros o perpendicular a la dirección de carga, como muestra la figura 2.2[9].

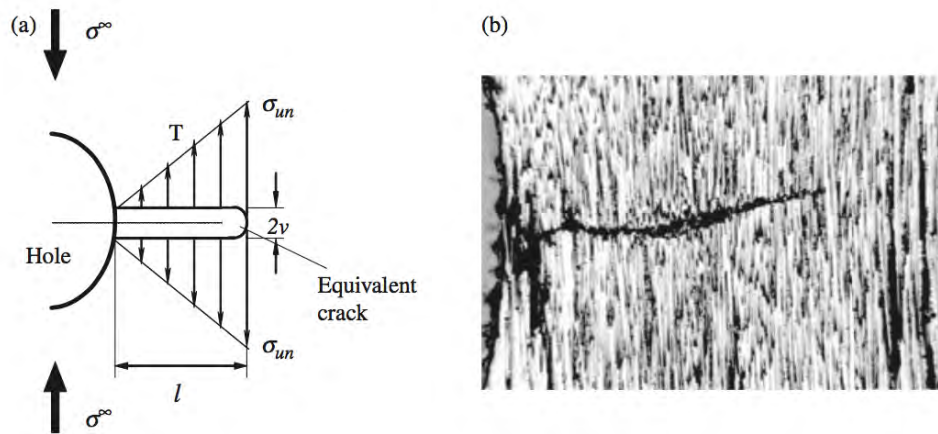


Figura 2.2: Fisura inducida por agujero[10]

Además, como el artículo *Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation*[2] recoge, las discontinuidades debidas a recortes, realizados para tener acceso a otras partes, o agujeros realizados para la introducción remaches, se convierten en zonas críticas cuando se encuentran bajo carga térmicas o mecánicas. Esto condiciona al equipo de diseño, a saber previamente el comportamiento de las muestras, para poder generar estructuras más complejas que posteriormente serán unidas con tornillos, pernos o remaches.

La concentración de tensiones por estos motivos adquiere una importancia especial, ya que cuando hay presencia de agujeros, estos se convierten en la causa y la zona del inicio de fallo[11]. Hasta el año 2008, el factor de concentración de tensiones había sido estudiado para diferentes dimensiones de placa isotrópicas, con un agujero de diferentes formas. Howland, encontró la solución al problema de placa larga y rectangular con agujero central, sometida a una carga de tensión. Posteriormente, Peterson y Heywood completaron el estudio añadiendo el ancho infinito de placa con agujero de diferentes formas. Por otro lado, Lekhnitskii¹[12] y Tan crearon varios formularios para el cálculo del factor de concentración de tensiones para diferentes materiales ortótropos[11].

La concentración de tensiones, en bordes de agujero, de estructuras realizadas en material compuesto, generan una gran preocupación a la comunidad de estudiosos. Ya que si en metales la tensión máxima generada en el borde del agujero es de $\sqrt{3} \cdot \sigma_o^2$, en laminados de material compuestos, para una configuración de placa idéntica, la tensión máxima en el borde es de alrededor de $3 \cdot \sigma_o$. Prácticamente se ve duplicada la tensión máxima. Por ello existe un gran número de artículos y estudios enfocados en el análisis del efecto de los agujeros en las placas de material compuesto[2].

¹El profesor Sergei Georgievich Lekhnitskii es un doctor en Física y Matemáticas y ganador del Premio Estatal de la Federación de Rusia. Científico en el campo de teoría de elasticidad de cuerpos, particularmente en la elasticidad de cuerpos anisótropos. Publicado en la versión revisada de 1977 de la edición rusa, por Mir Publishers[13]

² σ_o carga aplicada en los extremos de la placa

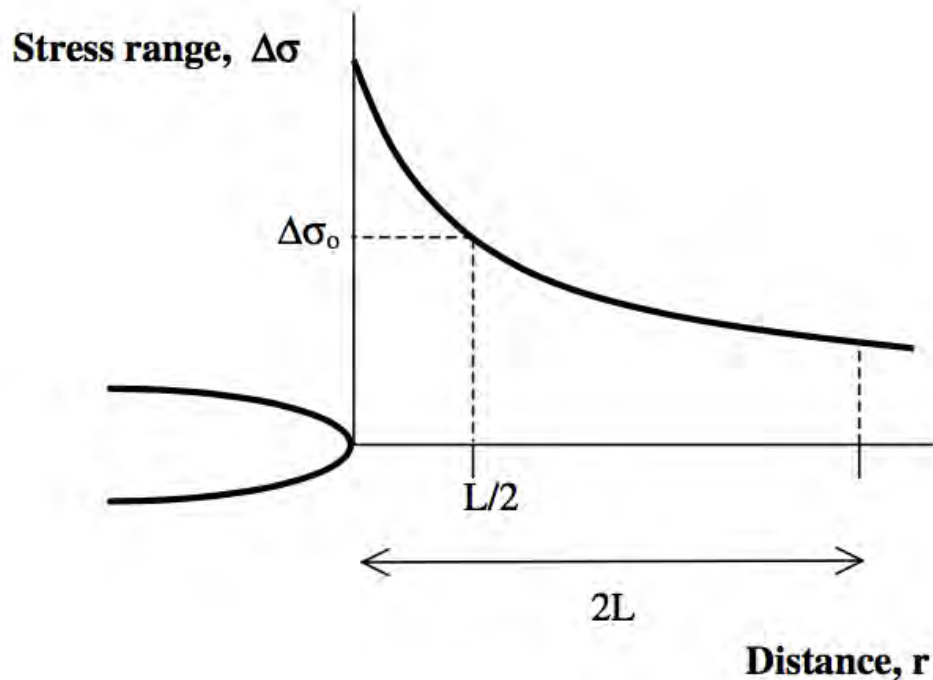


Figura 2.3: Tensión a lo largo del eje transversal al de aplicación de carga a partir del borde de un agujero[14]

Algunos estudios experimentales sobre laminados con agujeros, indican que una reducción severa de la rigidez, se puede dar debido a la presencia de discontinuidades, ya que funcionan como amplificadores de tensión[15]. Cuando se está realizando el diseño de componentes estructurales los cuales hay presencia de uniones, pernos, remaches o cortes, es imprescindible tener en cuenta la sensibilidad que estas zonas introducen. Además hay que ampliar estas medidas para posibles defectos en la fabricación o daños en servicio[15]. Se ha comprobado, que existe un efecto relacionado con el tamaño de agujero en la rigidez del espécimen de estudio. A medida que las dimensiones del agujero aumentan la rigidez de la placa disminuye[8].

Los estudios sobre la respuesta de los materiales compuestos frente a cargas de compresión comenzaron de los primeros años de la década de los 60 del siglo XX, cuando los materiales compuestos se erigieron como firmes candidatos a sustituir a los materiales típicos estructurales en la industria aeroespacial[16].

Los materiales compuestos cuentan con diferente comportamiento ante la tensión y la compresión. En compresión su comportamiento es más complejo, ya que las fibras sufren *micro-buckling*, micro-pandeo, lo cual no ocurren en tensión[1]. Este fenómeno es considerado este por algunos estudios como el principal mecanismo que gobierna el fallo en los materiales compuestos sometidos a compresión. Aun así, pese a esto como remarca el artículo, de S. Khedkar y colaboradores, hasta el día de hoy la mayoría de los trabajos publicados están realizados para casos de tensión. Por esto se ha decidido realizar este estudio bajo carga de compresión, añadiendo que por convenio las estructuras se diseñan para los casos más desfavorables y

estos, en materiales compuestos, se dan en la compresión[1].

El *Microbuckling* o micro-pandeo es el modo de fallo por el cual los materiales compuestos sufren colapsos localizados dentro de zonas muy estrechas, a menudo denominadas *Kink band* o banda de curvatura. En materiales de la familia Carbono/Epoxi, la banda de curvatura, cuenta típicamente con un ancho de entre diez y quince veces el diámetro de las fibras que componen la placa y suele contar con una inclinación de entre cinco y treinta grados respecto al eje horizontal[17, 18].

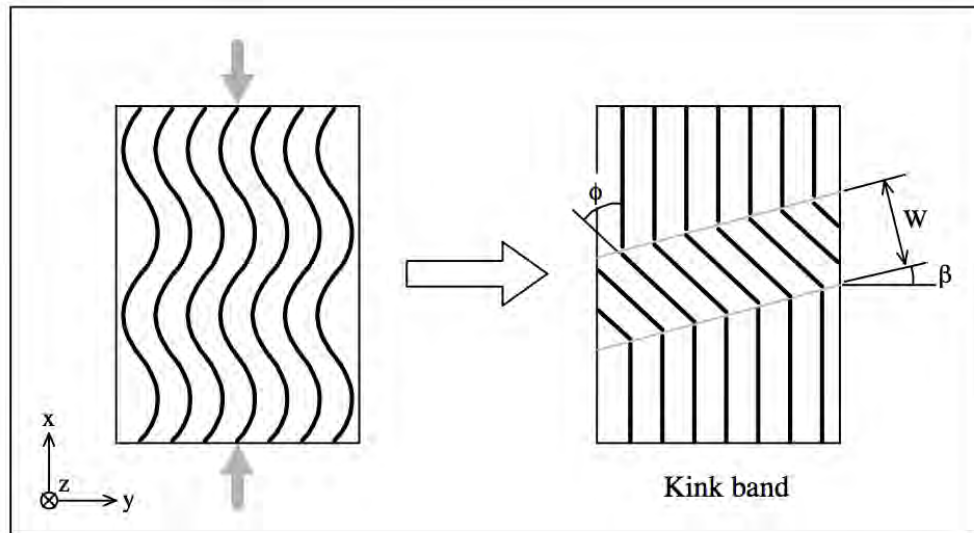


Figura 2.4: *Microbuckling* o micro-pandeo y *Kink band* o banda de curvatura [17]

En compresión la matriz y la interfase fibra-matriz toman un papel de gran importancia, ya que deben proporcionar soporte lateral a las fibras y prevenir a estas de sufrir pandeo en columna. Mientras que muchos trabajos de investigación han sido realizados para el fallo por tensión en paneles que contienen agujero, en comparación relativamente pocos, son las investigaciones para placas sometidos a compresión. La principal razón está en la dificultad asociada con las pruebas experimentales a compresión, en particular en alcanzar resultados reales, no distorsionados por las dimensiones de la placa [5].

La respuesta que tienen los laminados bajo cargas de compresión es un ejemplo importante de la necesidad de obtener la relación entre el daño y las propiedades del material. En encontrar esta relación, solucionaríamos uno de los principales problemas, que se da hoy en día, en el diseño de estructuras de este tipo de materiales[15].

Generalmente, para disminuir este efecto en las placas de material compuesto, se realizan mediante el apilamiento de sucesivas capas con distinta orientación, con el objetivo de alcanzar laminados multidireccionales, que se adapten a los requisitos de tensiones multidireccionales que los componentes sufren. Por otro lado, se busca reducir los pobres efectos de las propiedades transversales de los materiales unidireccionales[5].

A día de hoy, a pesar de las décadas de investigación, la predicción precisa y exacta del fallo de los materiales compuestos, continua siendo un reto. En muchos casos, la gran cantidad de fisuras en la matriz y los modos de fallo, así como sus interacciones, plantean un gran desafío tanto en modelos numéricos como en leyes constitutivas del materiales[19].

Aunque es posible realizar pruebas en los laboratorios sobre especímenes de materiales compuestos y medir ciertas respuestas, controlando parámetros como la carga, las dimensiones y las condiciones del material, surge la pregunta de la relación de los datos obtenidos con la resistencia de la lámina. Actualmente, la relación entre ellos, está sin resolver todavía. Especialmente, el efecto del tamaño del espécimen o el efecto de escalarlo, se ha convertido en una cuestión importante en el diseño con materiales compuestos en los últimos años. Un sustancial número de ensayos de componentes a tamaño real y estructurales es actualmente requerido para certificar una nueva aeronave, esto suele tener un coste de más de diez millones de libras para un avión típico, sin contar con el ensayo a tamaño real. Las autoridades aeronavegabilidad podrían estar preparados para no exigir tal número de ensayos, si el análisis y la predicción del fallo fuese más fiable. Esto tendría como objetivo la reducción del coste, estructuras de material compuesto más fidedignas y animar a un uso más generalizado de los materiales compuestos en la industria aeroespacial[20].



Figura 2.5: Pruebas de resistencia en alas de un avión[21]

Modelización

3.1. Problema de estudio

En este trabajo se va a analizar una placa 2D de tipo laminado, realizada en material compuesto. La placa tiene forma rectangular y un espesor muy inferior a cualquiera de sus otras dimensiones. Las dimensiones de la placa son L para la longitud, w para el ancho de placa y e para el espesor, como muestra la figura 3.1. Además, como muestra la figura, la placa se somete a una carga de compresión, estando la carga alineada con el eje Y , para todos los subestudios del proyecto. Adicionalmente, en los lados que soportan las cargas, se restringe el giro en todos los ejes y los movimientos en dirección del eje Z .

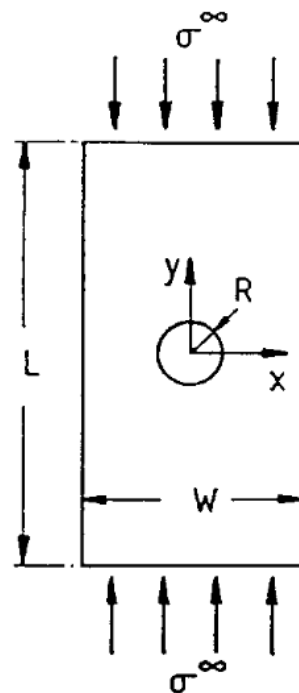


Figura 3.1: Modelo base de la placa de estudio

Por otro lado, el modelo base contará con cuatro variaciones durante el trabajo, dependiendo de la posición y número de agujeros que la placa presente. Los agujeros que se van a modelizar en la placa son agujeros circulares, con R como radio, como muestra la figura 3.1. La primera variación se consigue realizando, en la placa, un único agujero centrado, este diseño se nombra como 1H, figura 3.2a. Y las tres variaciones restantes, contarán con dos agujeros, que variarán sus posición relativa entre longitudinal, llamado 2HL figura 3.2b, tangencial, indicado como 2HT figura 3.3a o perpendicular, denominado 2HD figura 3.3b.

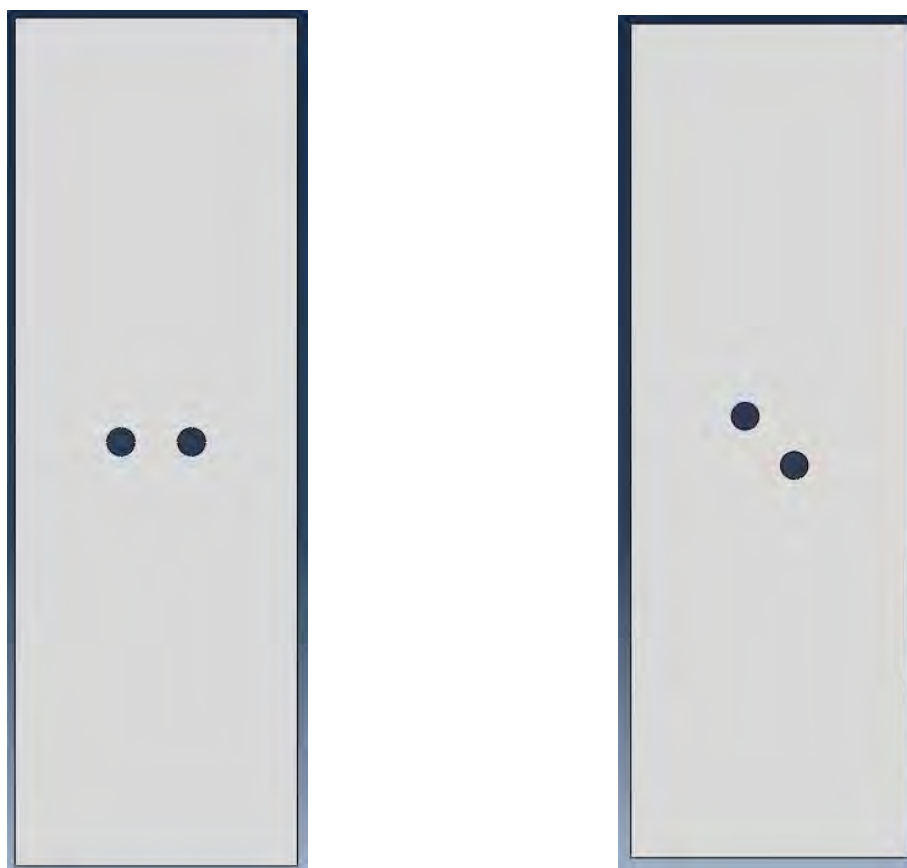


(a) Variación monoagujero central, 1H



(b) Variación dos agujeros longitudinales, 2HL

Figura 3.2: Variaciones del modelo base



(a) Variación dos agujeros tangenciales, 2HT

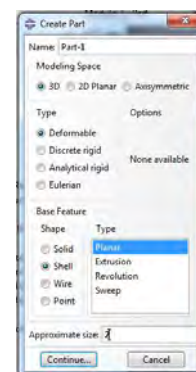
(b) Variación dos agujeros perpendiculares, 2HD

Figura 3.3: Variaciones del modelo base

3.2. Descripción del proceso de modelización

La modelización del diseño es el inicio del trabajo. Para ello como se ha indicado previamente, se realizará en el programa Abaqus versión 6.14. Se ha recurrido al *Manual del usuario* del programa como soporte para su realización[22].

Para configurar un espécimen en Abaqus 6.14 hay que completar y rellenar una serie de *Módulos* en los cuales el programa solicita información relativa al caso que se quiere reproducir. El software comienza por la configuración de la pieza en sí, proporcionando datos sobre dimensiones y materiales de la placa. A continuación se configura el entorno de las condiciones de contorno y carga a los cuales está sometida la pieza en estudio. Y finalmente, se configuran las variables relacionadas con la obtención de resultados como son el mallado y las variables que el programa va a dar como

**Figura 3.4:** Módulo *Create Part*

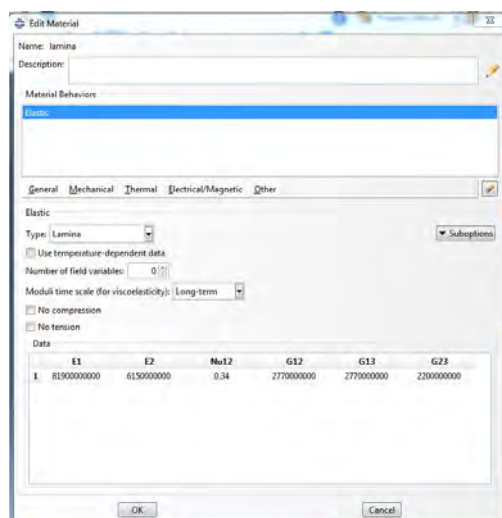
resultados.

Siendo así el primer módulo a completar, el llamado módulo *Create Part*. En el se eligen las dimensiones espaciales necesarias, el tipo y la forma. En este estudio se trabaja con placas diseñadas en espacio 3D, tipo deformable, forma *Shell* plana. La figura 3.4 muestra la primera pantalla de la sección *Create Part*.

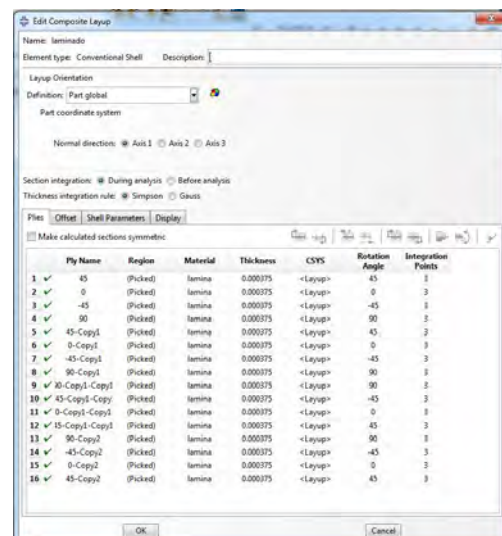
Tras pulsar el comando *Continue*, se abre una segunda pantalla en la que el usuario debe realizar el boceto del elemento a modelizar, en este caso se realizará el de la planta de la placa.

El siguiente módulo en el que se trabaja es el llamado *Property*, en el se introduce el material de composición de la placa de estudio. En este mismo módulo se introduce el apilamiento, que el laminado va a tener.

En el comando *Edit material*, introducimos la propiedades del material. Para ello se selecciona *Mechanical* y dentro de ella *elastic*, en el caso de un material compuesto hay dos opciones disponibles, la primera opción es el tipo *Type Engineering constants*, en ella se introduce las variables elásticas en las tres direcciones ($E1$, $E2$, $E3...$). La segunda opción es el tipo *Lamina*, aquí solamente, son necesarias las variables del plano, para este proyecto dicha opción es viable, también. En la figura 3.5a se refleja como se muestra para el caso de *Lamina*.



(a) Pantalla *Edit material*



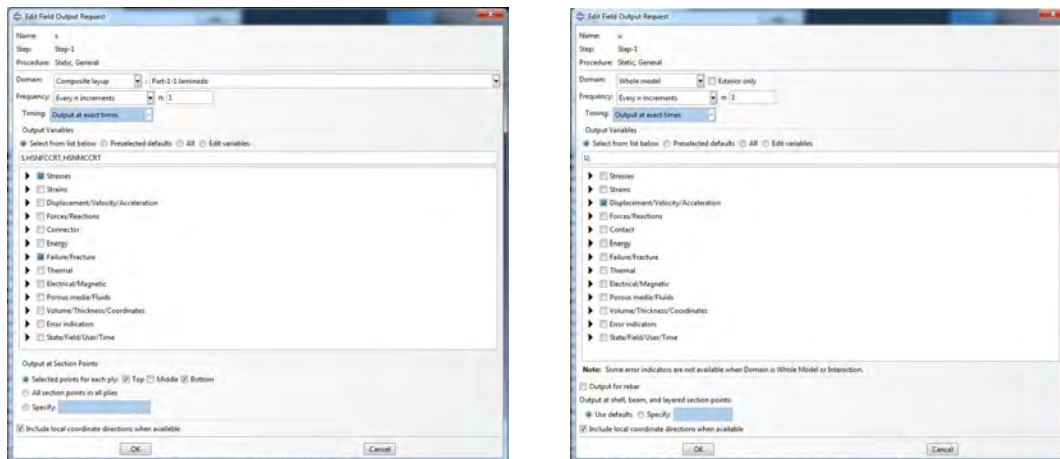
(b) Pantalla *Edit composite layup*

Figura 3.5: Módulo *Property*

A continuación, en el comando *Edit composite layup*, el tipo de laminado que se usa es *Conventional shell*, al estar trabajando con elementos tipo *Shell*. Se establece el número de capas que la lámina tiene, el material de cada una y su orientación, así como el espesor de cada capa. La pantalla una vez completa, se vería como la figura 3.5b.

En el módulo *Assembly* solamente es necesario crear un *Independent assembly*.

Mientras que en el módulo *Step* se debe crear dos secciones diferentes dentro de la sección *Edit Field output request*. Mediante una de ella se obtendrá las las tensiones para cada capa, usando el dominio tipo *Composite layup*. Las variables que se seleccionan son las variables *S* dentro de *Stress* dentro de *Failure/Fracture*. Además, es preciso seleccionar que los puntos de salidas sean *Top* y *Bottom*, para que los resultados sean posteriormente útiles. Como queda reflejado en la figura 3.6a. En la segunda sección obtendremos las deformaciones, para ello el dominio será sleccionado el tipo *Whole model*, como muestra la figura 3.6b.

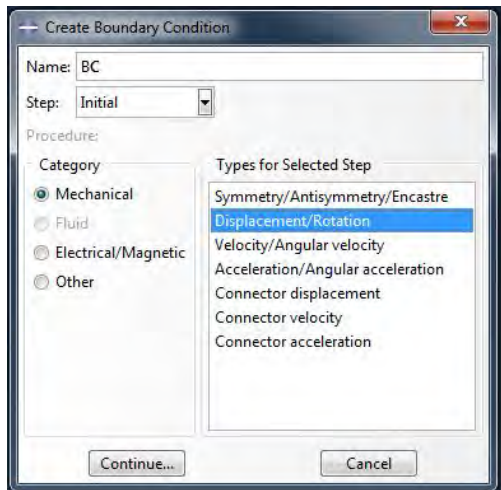
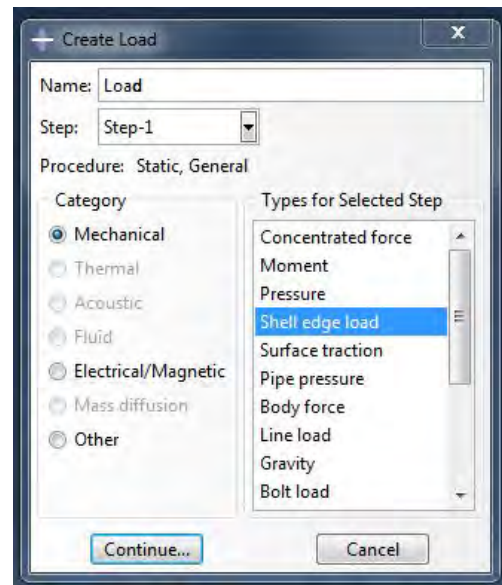


(a) Obtención de tensión y criterio de rotura

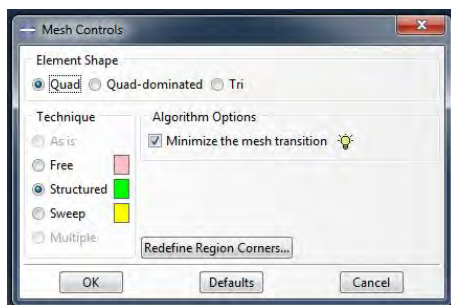
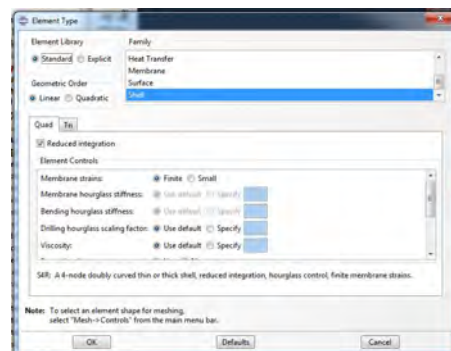
(b) Obtención de desplazamiento

Figura 3.6: Módulo *Step*, Comando *Edit Field output request*

Los siguientes módulos a modelizar son *Load* y *Mesh*. En el primero se introducen las condiciones de contorno, como categoría *Mechanical* y tipo *Displacement/Rotation*. El tipo de carga que para este trabajo se requiere es categoría *Mechanical*, tipo *Shell edge load*, las unidades de este tipo de carga es fuerza entre metros ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$).

(a) Comando *Create Boundary condition*(b) Comando *Create Load***Figura 3.7:** Módulo *Load*

En el módulo *Mesh* se realiza el mallado de la placa. La placa debe ser subdividida de tal manera que el mallado que se realice sea un mallado estructurado, el cual asegura los resultados exactos. Concretamente se elige la forma *Quad*, con técnica *Structured*, seleccionando la opción de algoritmo de mínima transición del mallado, como refleja la figura 3.8a. Además es necesario asegurar que el tipo de elemento seleccionado para la malla es *Shell*, figura 3.8b.

(a) Comando *Mesh control*(b) Comando *Element type***Figura 3.8:** Módulo *Mesh*

Post-proceso par la obtención de resultados

En el modulo de visualización se ven los resultados correspondientes a las *Output field request* que se han programado en el módulo *Step*. Para este trabajo se obtiene los mapas de las tensiones, de los desplazamientos y de los giro en los tres ejes cartesianos. Pero estos valores no son los que interesan en el estudio de placas, pero si son necesarias para obtener las variables buscadas. Las variables de interés real son la concentración de tensiones en la placa y la rigidez de la placa.

A continuación, se explica como a través de los datos obtenidos en Abaqus se obtienen los resultados finales deseados.

4.1. Rigidez en el plano en dirección de carga

La rigidez en el plano en dirección de carga que la placa sufre es un valor, él cual Abaqus no proporciona directamente, como ya se ha dicho, para ello es necesario los valores de desplazamiento en el eje de carga que Abaqus si da, si previamente se ha solicitado en el módulo *Step*.

En este trabajo se define la rigidez en el plano en dirección de la carga, eje Y, como:

$$E_y^{pl} = \frac{\sigma_o}{\Delta L/L_o} [Pa] \quad (4.1)$$

Donde:

- σ_o es la presión aplicada en las caras. Siendo:

$$\sigma_o = \frac{F_y}{W \cdot e} [Pa] \quad (4.2)$$

- F_y es la fuerza aplicada en el eje Y en Newtons.
- W es el ancho de la placa en metros.
- e es el espesor de la placa en metros.
- ΔL es la variación de longitud en dirección del eje Y en metros.
- L_o es la longitud inicial en dirección del eje Y en metros.

4.2. Concentración de tensiones

La concentración de tensiones, al igual que la rigidez, no es un parámetro que Abaqus dé, para ello son necesarias las tensiones que el programa proporciona tras correr cada caso deseado.

La concentración de tensiones se define como, [23]:

$$KT = \frac{N_y}{F_y/W} \quad (4.3)$$

Donde:

- N_y es la tensión por metro en el eje Y en Pascales metros.
- F_y es la fuerza aplicada en el eje Y en Newtons.
- W es el ancho de la placa en metros.

N_y se calcula mediante la expresión 4.5, [23].

$$N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y \cdot dz \text{ [Pa} \cdot \text{m]} \quad (4.4)$$

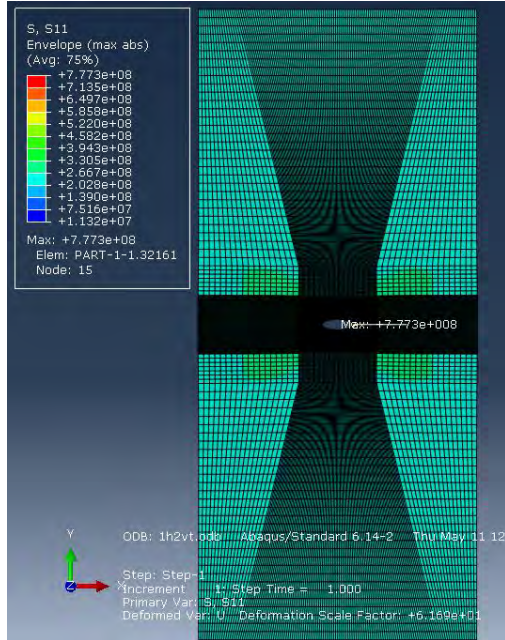
Al estar trabajando con placas de espesor continuo, la ecuación queda como:

$$N_y = \sum_i^n (\sigma_{y_i} \cdot e_i) \text{ [Pa} \cdot \text{m]} \quad (4.5)$$

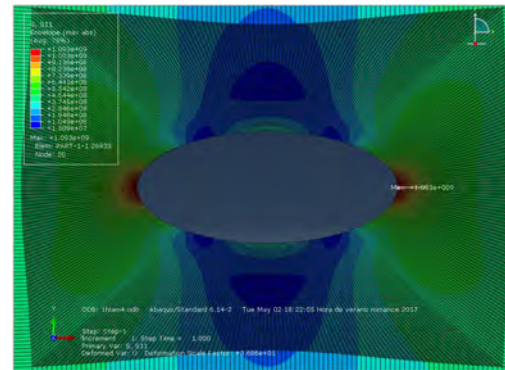
Donde:

- σ_{y_i} es la tensión en el eje Y en Pascales de una capa.
- e_i es el espesor de capa en metros.

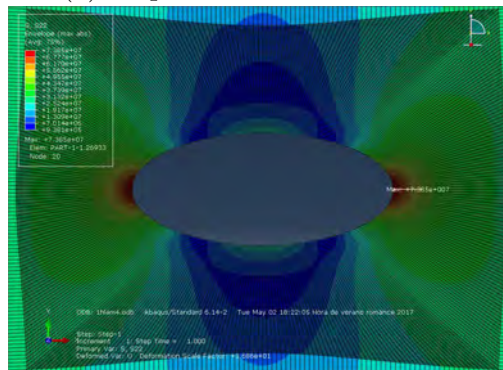
σ_y se obtiene a través de los datos de tensiones de Abaqus. Para su obtención se deben realizar una serie de cambios en la visualización de los resultados del programa, ya que el formato predeterminado muestra en el mapa de colores simplemente la capa superior del apilamiento. Así que, se deberá buscar las tensiones en todas las capas y el punto de máxima tensión.



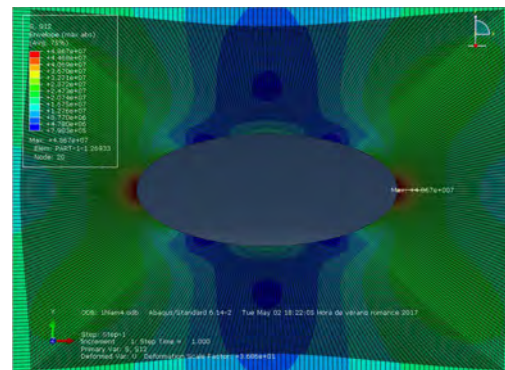
(a) Mapa de color de tensiones



(b) Tensión S11



(c) Tensión S22



(d) Tensión S12

Figura 4.1: Módulo *Visualization*, tensiones

Para la obtención de la localización del punto con tensión máxima en la placa, se deben realizar varios pasos. Primeramente, en el comando *Result*, en la opción *Section point* se abrirá una pantalla, en ella se elige de categoría la opción *Envelope*, con el criterio de *Max. absolute* y la posición *Integration point*. Las pantallas que aparecen se muestran en las figuras 4.2a y 4.2b. Esto permite que en el mapa de colores se muestre, para cada elemento de malla, la tensión de la capa en la que alcance un valor máximo absoluto, como se ve en la figura 4.1a.

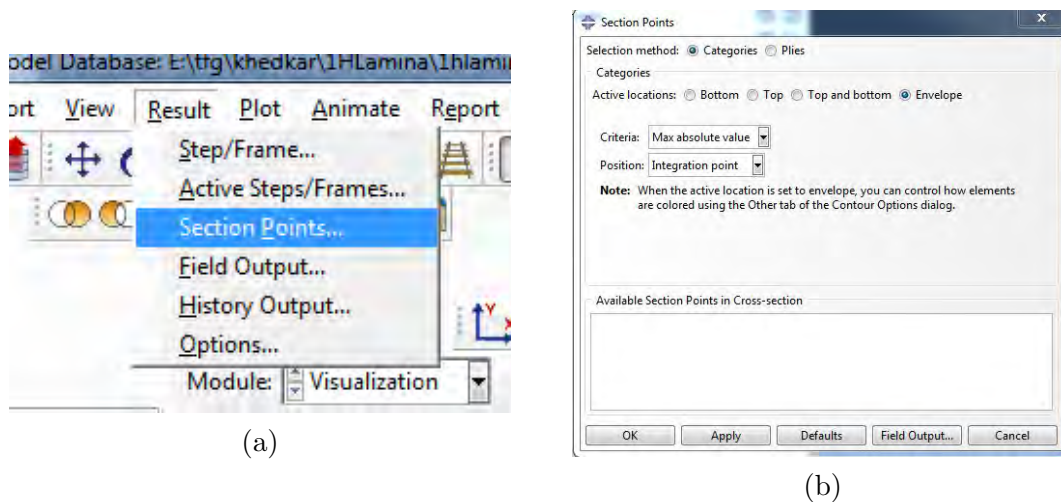


Figura 4.2: Módulo *Visualization*, Comando *Result: Section point*

Por otro lado, hay que activar en el comando *Limits* la opción *Show location: Max* del comando *Contour plot option*, pudiendo saber así el punto de la placa con la tensión mayor. La figura 4.3a muestra el comando y la figura 4.3b como se ve en pantalla.

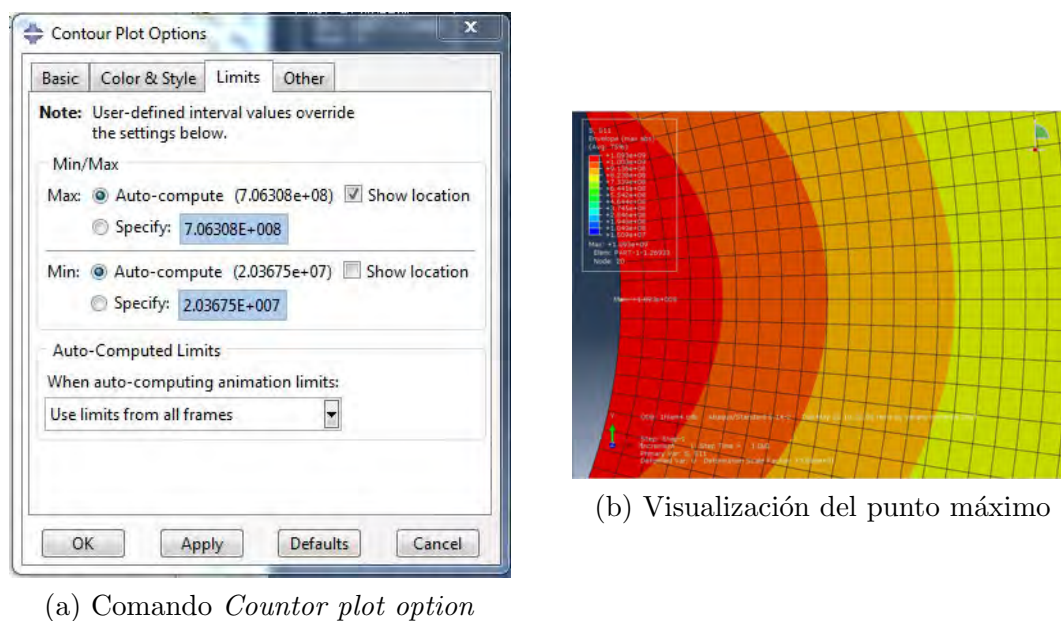
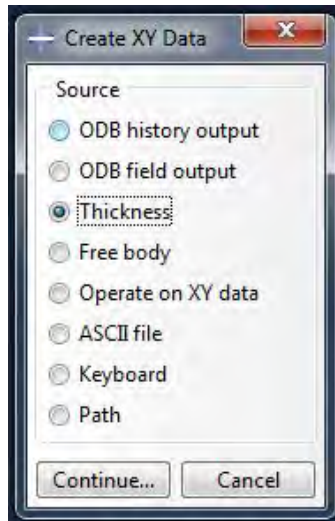
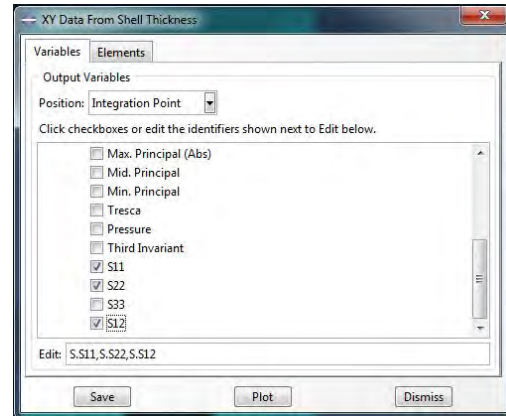
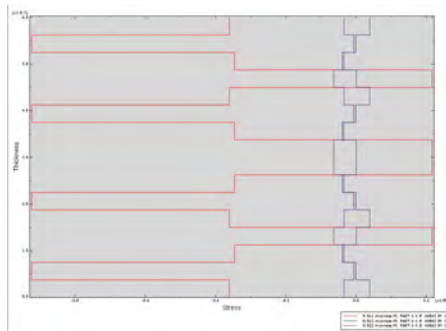


Figura 4.3: Módulo *Visualization*, comando *Contour plot options*

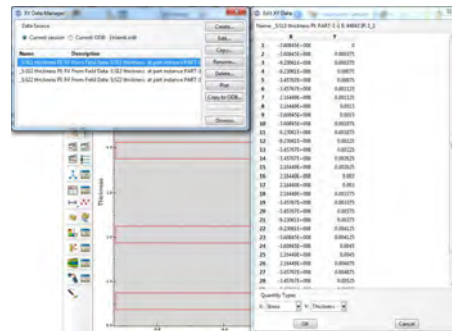
Por último, para poder ver las tensiones de cada capa, se usa el comando *Create XY data* eligiendo *Source: Thinckness*, como se muestra en la figura 4.4a. Seguidamente se escoge las variables S_{11} , S_{22} y S_{12} , como se ve en la figura 4.4b. Por último, para escoger el elemento del mallado, teniendo el mapa de colores de la tensión S_{11} elegimos el punto de mayor tensión que aparece, es para este paso por lo que es necesario realizar los pasos el párrafo anterior.

(a) Comando *Create XY data*(b) Comando *XY data from shell thickness***Figura 4.4:** Módulo *Visualization*, Comando *XY data manager*

De esta manera se consigue tener una gráfica, como muestra la figura 4.5a, que enfrenta el espesor de la placa a las tensiones S_{11} , S_{22} y S_{12} , locales de cada capa. Además, Abaqus nos da la opción de tener los datos en formato lista que podemos copiar en un programa tipo Excel para posteriormente ser usados, la figura 4.5b muestra como se ve. Esto se consigue en el comando *XY data manager*



(a) Gráfica espesor frente a tensión

(b) Comando *XY data manager***Figura 4.5:** Módulo *Visualization*, Comandos *XY*

Con las tensiones recogidas, a través del comando *XY data manager*, como se muestra en la figura 4.5b, se obtiene el termino σ_y de la ecuación 4.5. Como estos valores son en ejes locales de capa, es necesario realizar un cambio de base. Para ello se usa el programa Excel y la matriz de cambio de base 4.6.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} [Pa] \quad (4.6)$$

Donde:

- Siento θ el ángulo formado por el eje 1 y el eje X.
- Quedando θ como 90° menos la orientación de la capa.

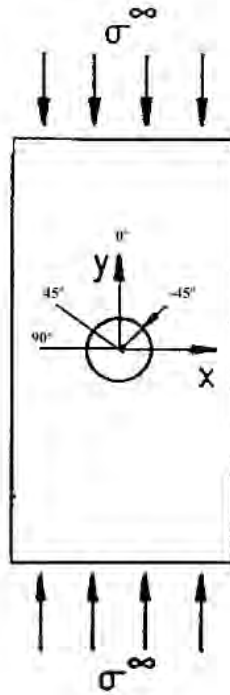


Figura 4.6: Orientación de capas

Quedando σ_y finalmente como se muestra en la ecuación 4.7, obtenida mediante el cambio de base 4.6

$$\sigma_y = S_{11} \cdot \sin^2 \theta + S_{22} \cdot \cos^2 \theta + S_{12} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \text{ [Pa]} \quad (4.7)$$

Verificación de la modelización

Para asegurar la validez de los resultados obtenidos mediante el modelo implementado en Abaqus, se estudian dos casos:

1. Placa con un agujero comparada con los resultados de un método analítico.
2. Placa con varios agujeros comparada con un método experimental publicado en la revista *Journal of Composite Materials*.

Pudiendo saber, al final de la verificación, si la metodología seguida en el proyecto es correcta y veraz.

5.1. Comprobación de placa con un agujero

La primera comparación se hace con el Método analítico de Sergei Georgievich Lekhnitskii[12]. A través de dicho método se puede verificar el caso de un agujero central, ya que Lekhnitskii propuso una forma analítica mediante la cual es posible obtener el factor de concentración de tensiones en las cercanías de un agujero, siempre que este sea realizado en el centro de la placa.

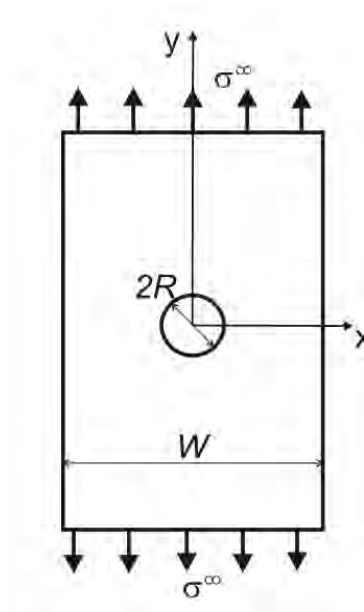


Figura 5.1: Lámina con agujero sometida a tensión[6]

La fórmula para el cálculo del factor de concentración de tensiones, del caso de agujero circular, se obtiene mediante la ecuación 5.1[6].

$$KT = \frac{1}{2} \cdot f_w \{ 2 + (C)^2 + 3 \cdot (C)^4 + (K_{max}^{\infty} - 3) \cdot [5 \cdot (C)^6 - 7 \cdot (C)^8] \} \quad (5.1)$$

Donde:

$$C = \frac{R}{R + x} \quad (5.2)$$

- R es el radio del agujero en metros.
- x es la distancia en el eje X donde queremos conocer la concentración de tensiones, sabiendo que x=0 para el borde de agujero.
- f_w es el factor de corrección para placa de ancho finito. Se calcula mediante la fórmula 5.3.

$$f_w = \left(\frac{3 \left(1 - \frac{2R}{W}\right)}{2 + \left(1 - \frac{2R}{W}\right)^3} + \frac{1}{2} \left(\frac{2R}{W} \cdot M \right)^6 \cdot (K_{max}^{\infty} - 3) \left[1 - \left(\frac{2R}{W} \cdot M \right)^2 \right] \right)^{-1} \quad (5.3)$$

Donde:

- M es el factor de magnificación, se calcula mediante la fórmula 5.4

$$M = \sqrt{\frac{\sqrt{1 - 8 \cdot \left[\frac{3(1 - \frac{2R}{W})}{2 + (1 - \frac{2R}{W})^3} - 1 \right]} - 1}{2 \cdot \left(\frac{2R}{W} \right)^2}} \quad (5.4)$$

- W es el ancho de placa en metros
- K_{max}^{∞} es el factor de concentración de tensión en el borde del agujero para una placa ortótropa infinita.

$$K_{max}^{\infty} = 1 + \sqrt{\frac{2}{A_{22}} \left(\sqrt{A_{11} \cdot A_{22}} - A_{12} + \frac{A_{11} \cdot A_{22} - A_{12}^2}{2 \cdot A_{66}} \right)} \quad (5.5)$$

Donde:

- A_{11} , A_{22} , A_{12} y A_{66} son las componentes de la matriz de rigidez.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} = \sum [Q_i] \cdot e_i \quad (5.6)$$

- Siendo e_i el espesor de cada capa.
- Para placas a 0° :

$$[Q_0] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{21} \cdot \nu_{12}} & \frac{E_2 \cdot \nu_{21}}{1 - \nu_{21} \cdot \nu_{12}} & 0 \\ \frac{E_1 \cdot \nu_{12}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{12}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

- Para placas a 90° es:

$$[Q_{90}] = \begin{bmatrix} Q_{22} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

- Para placas a 45° y -45° es:

$$[Q_{\pm 45}] = \begin{bmatrix} L + Q_{66} & L - Q_{66} & \pm N \\ L - Q_{66} & L + Q_{66} & \pm N \\ \pm N & \pm N & L - Q_{12} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Siendo:

$$L = \frac{Q_{11} + Q_{22}}{4} + 0,5 \cdot Q_{12} \quad (5.10)$$

$$N = \frac{Q_{11} - Q_{22}}{4} \quad (5.11)$$

Dichas placas están hechas de un material Carbono/Epoxi con las propiedades que aparecen en la tabla 5.1. Con un apilamiento $[45/0/-45/90]_{2s}$, como muestra la figura 5.2 y un espesor total del laminado de 6 mm.

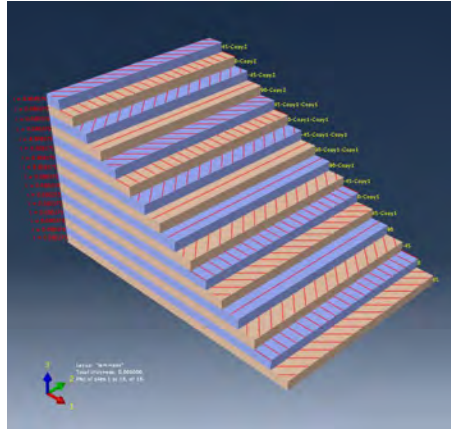


Figura 5.2: Apilamiento del laminado: $[45/0/-45/90]_{2s}$

| | |
|------------|-----------|
| E_1 | 81,9 GPa |
| E_2 | 6,15 GPa |
| ν_{21} | 0,34 |
| ν_{12} | 0,0255 |
| G_{12} | 2,77 GPa |
| L | 23,26 GPa |
| N | 19,1 GPa |

Tabla 5.1: Propiedades del material Carbon/Epoxi

Siendo las matrices de rigidez de dicho material:

$$[Q_0] = \begin{bmatrix} 82,62 & 2,11 & 0 \\ 2,11 & 6,20 & 0 \\ 0 & 0 & 2,77 \end{bmatrix} [GPa] \quad (5.12)$$

$$[Q_{90}] = \begin{bmatrix} 6,20 & 2,11 & 0 \\ 2,11 & 82,62 & 0 \\ 0 & 0 & 2,77 \end{bmatrix} [GPa] \quad (5.13)$$

$$[Q_{\pm 45}] = \begin{bmatrix} 26,03 & 20,49 & \pm 19,1 \\ 20,49 & 26,03 & \pm 19,1 \\ \pm 19,1 & \pm 19,1 & 21,15 \end{bmatrix} [GPa] \quad (5.14)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 211,32 & 67,789 & 0 \\ 67,789 & 211,32 & 0 \\ 0 & 0 & 71,762 \end{bmatrix} [MPa] \quad (5.15)$$

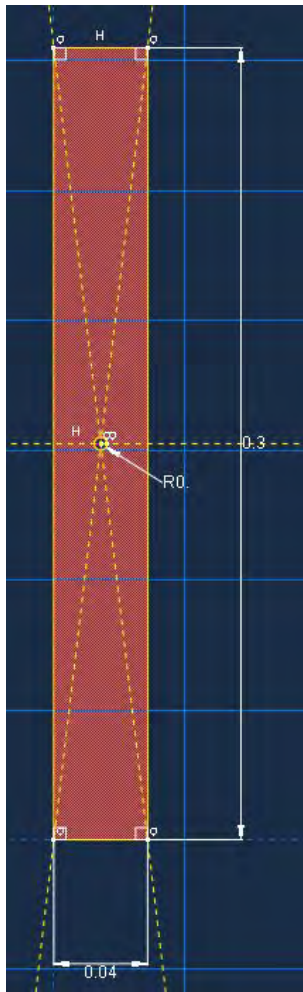
Para que los resultados no sean distorsionados por efecto de borde, el cociente entre el ancho de placa (w) y el diámetro del agujero tiene que ser estrictamente mayor a 3,5, como queda recogido en el artículo *Progressive failure analysis of CFRP laminate with interacting holes under compressive loading* [1].

La tabla 5.2 muestra los valores que toma la concentración de tensiones para diferentes anchos de placa y radios de agujero, según el método analítico de Lekhnitskii.

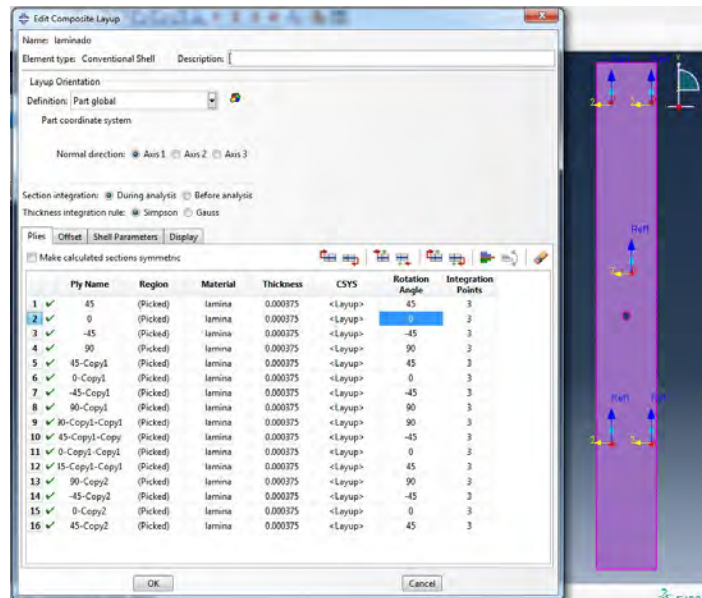
| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R (m) | 0,0025 | 0,0025 | 0,005 | 0,005 | 0,001 |
| w (m) | 0,036 | 0,05 | 0,05 | 0,036 | 0,036 |
| w/D > 3,5 | 7,2 | 10 | 5 | 3,6 | 18 |
| M | 1,4439 | 1,4429 | 1,4351 | 1,4094 | 1,4348 |
| K_{max}^{∞} | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 |
| f_w | 1,0214 | 1,0107 | 1,0467 | 1,0969 | 1,0032 |
| KT | 3,0641 | 3,0322 | 3,14 | 3,2908 | 3,0096 |

Tabla 5.2: Valores de KT según el método Lekhnitskii

A continuación, se muestra el estudio numérico del caso 1 de la tabla 5.2. Las dimensiones de esta placa son de 305 mm de largo y 36 mm de ancho y un radio de agujero de 2,5mm. Para la reproducción en Abaqus, del resto de casos que contiene la tabla 5.2, se mantienen todas las variables y dimensiones de placa a excepción del ancho y el radio de agujero.



(a) Dimensiones

(b) Apilamiento y dirección de ejes locales de capas a 0° **Figura 5.3:** Diseño de placa

El modelo se ha realizado aplicando una carga compresiva de 30 kN en los lados de la placa paralelos al eje X y restringiendo, en los mismos, el movimiento en el eje Z, así como los giros en los tres ejes.

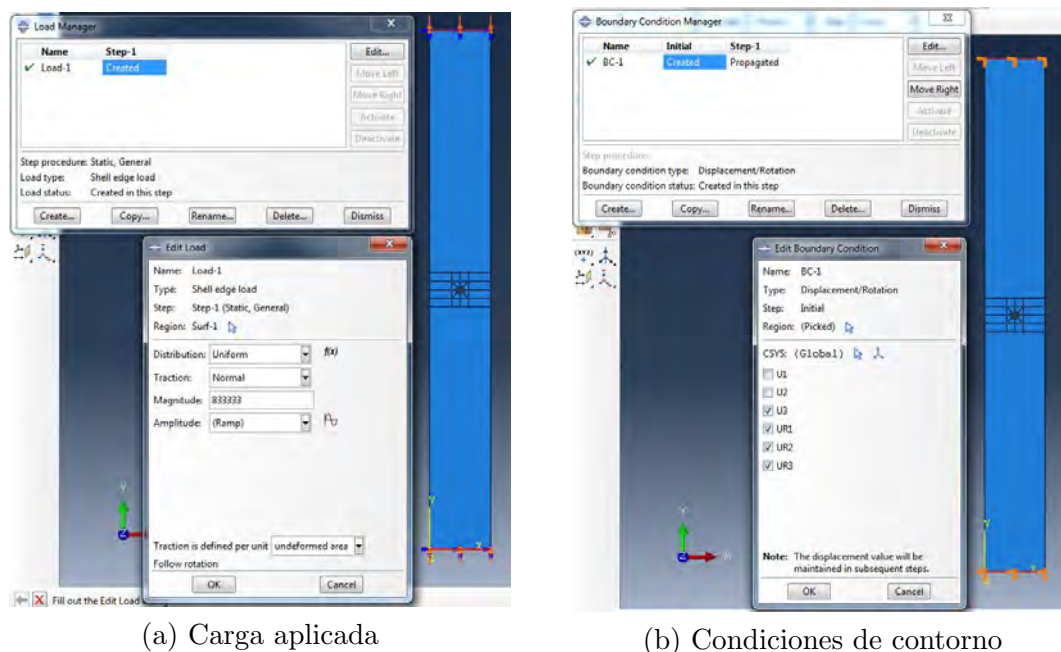


Figura 5.4: Condiciones de placa

En la tabla 5.3, se muestran para este caso, como se obtiene el valor de la concentración de tensiones mediante las tensiones obtenidas a través de su modelización en Abaqus. El programa proporciona las tensiones de las 16 capas con las que el laminado cuenta, por el contrario en la tabla 5.3 solamente se muestra una capa de cada orientación, ya que las capas con el mismo ángulo, sin importar su posición en el laminado cuentan con la misma tensión. Así el total de capas se incluyen en los cálculos necesarios para la obtención de la concentración de tensiones.

| CAPA | S_{11} | S_{22} | S_{12} | σ_y |
|-------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 45 | -3,97E+08 | -3,73E+07 | 4,87E+07 | -2,66E+08 |
| 0 | -1,09E+09 | -1,91E+06 | -7,73E+05 | -1,09E+09 |
| -45 | -3,75E+08 | -3,85E+07 | -4,87E+07 | -2,55E+08 |
| 90 | 3,21E+08 | -7,39E+07 | 7,73E+05 | -7,39E+07 |
| N_y | | | | -2,53E+06 |
| KT | | | | 3,0393 |

Tabla 5.3: Caso 1, tamaño de elemento alrededor del agujero de 0,00004 m, con un número de elementos total de 66084

En la tabla 5.4 podemos ver los resultados de las concentraciones tensiones para los cinco casos de la tabla 5.2 según la modelización en Abaqus. En todos los casos el tamaño de elemento del mallado alrededor del agujero es de 0,00004, generando un total de 66084 elementos en el total de la placa. Así mismo la tabla muestra el error cometido frente a los valores de KT de Lehnitskii.

| CASO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| KT Lekhnitskii | 3,0641 | 3,0322 | 3,1400 | 3,2908 | 3,0096 |
| KT Abaqus | 3,0393 | 3,0049 | 3,1280 | 3,2927 | 2,9197 |
| Error (%) | 0,8173 | 0,9089 | 0,3824 | 0,0559 | 3,0804 |

Tabla 5.4: Verificación del método de modelización

Como se ve en la tabla 5.4 y el error mayor que existe entre el método analítico y el método numérico es de 3,0804 % por lo que se puede decir que la modelización de la placa se ha realizado correctamente.

Adicionalmente, se comprueba la evolución de la variable KT a lo largo del eje X, a través del método analítico y numérico empleados en este estudio. La tabla 5.5 y su gráfica de correspondencia, figura 5.5, muestran los resultados obtenidos para ambos métodos.

| Posición | 0 | 0,00004 | 0,00008 | 0,00012 | 0,00016 | 0,0002 | 0,00024 | 0,00028 | 0,00032 |
|--------------------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| M | 1,4439 | 1,4439 | 1,4439 | 1,4439 | 1,4439 | 1,4439 | 1,4439 | 1,4439 | 1,4439 |
| K_{max}^{∞} | 3,0000 | 3,0000 | 3,0000 | 3,0000 | 3,0000 | 3,0000 | 3,0000 | 3,0000 | 3,0000 |
| f_w | 1,0214 | 1,0214 | 1,0214 | 1,0214 | 1,0214 | 1,0214 | 1,0214 | 1,0214 | 1,0214 |
| KT Lekhnitskii | 3,0641 | 2,9539 | 2,8515 | 2,7564 | 2,6678 | 2,5853 | 2,5083 | 2,4363 | 2,3690 |
| KT Abaqus | 3,0393 | 2,9785 | 2,9203 | 2,8643 | 2,8106 | 2,7589 | 2,7093 | 2,6615 | 2,6156 |
| Error % | 0,8173 | 0,8275 | 2,3531 | 3,7682 | 5,0788 | 6,2939 | 7,4191 | 8,4610 | 9,4252 |

Tabla 5.5: Variación de la variable KT a lo largo del eje X

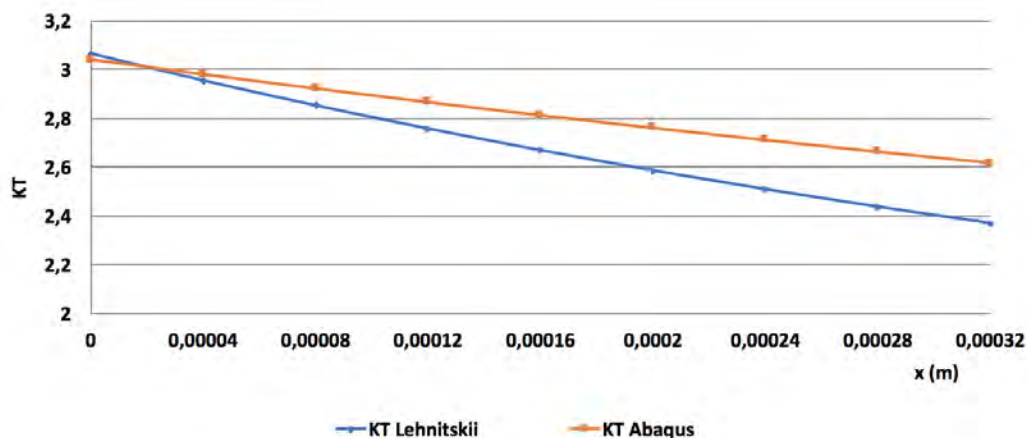


Figura 5.5: KT frente a distancia en x

Como queda reflejado en la tabla 5.5 y en la gráfica de la figura 5.5, los valores son similares. El máximo error que se comete en el método numérico frente al analítico es menor a un 10 %, siendo prácticamente cero el error en el borde de agujero, que es la zona de mayor concentración de tensiones y por tanto la más crítica.

5.2. Comprobación de placa con varios agujeros

En esta segunda parte de la verificación, no sólo se compara el caso de placa con un solo agujero, sino los tres casos de dos agujeros restantes. Para ello se va a realizar los cuatro casos que el artículo *Progressive failure analysis of CFRP laminate with interacting holes under compressive loading* presenta. De esta manera si los resultados obtenidos mediante la forma de trabajo de este trabajo da resultados iguales o similares a los del artículo se podrá decir que la concluir que la metodología seguida en el proyecto es correcta y veraz.

Las placas estudiadas son de 305 mm de largo por 36 mm de ancho, y de espesor 6 mm. El radio de agujero, se mantiene constante durante este estudio y es de 2,5 mm. El material del que están realizadas es un Carbono/Epoxi con las propiedades de la tabla 5.1 en la página 26, y un apilamiento $[45, 0, -45, 90]_{2s}$, el mismo que muestra la figura 5.2 en la página 26.

En las placas biagujero se varía la distancia entre sus centros, variando de esta manera, el coeficiente entre la distancia y el diámetro (a/D) desde 1,5 hasta 4,5. Siendo las cuatro configuraciones geométricas básicas para este apartado las que se representan en las figuras 5.6.

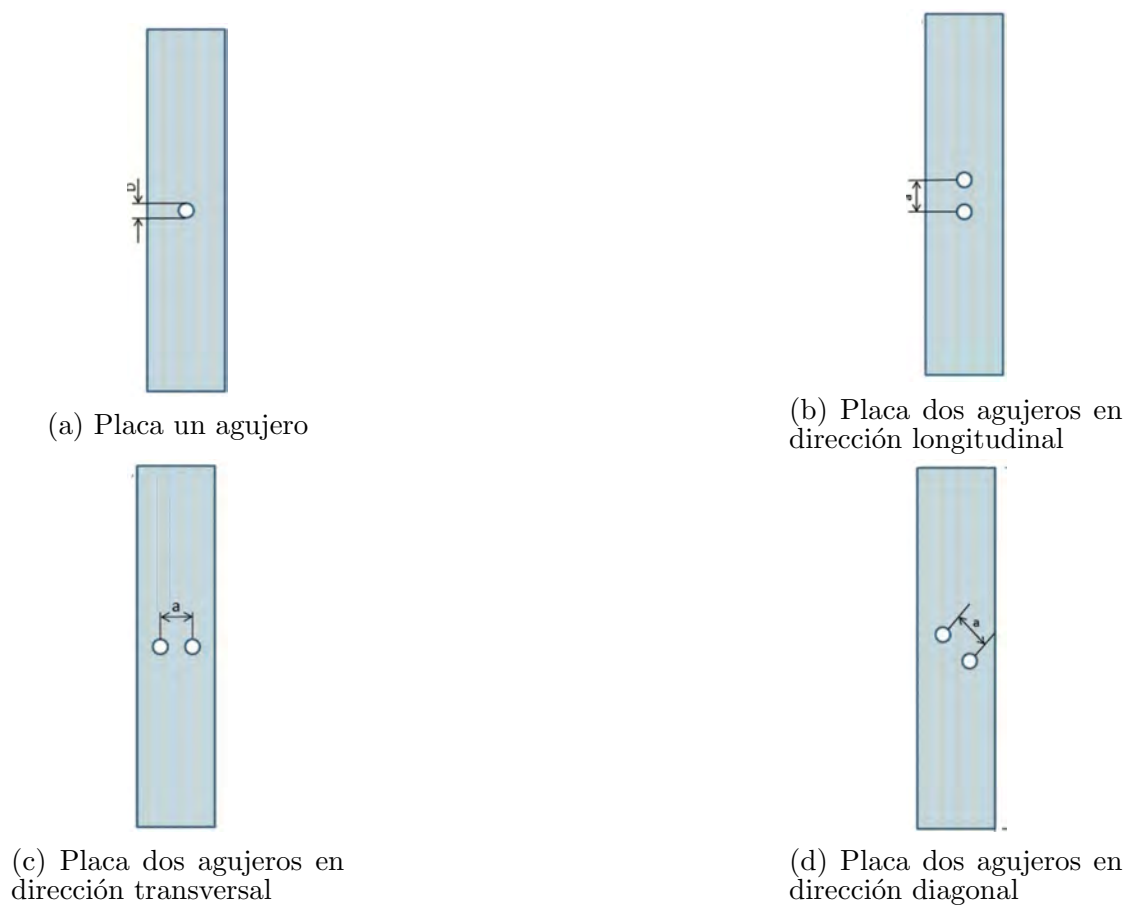


Figura 5.6: Configuraciones del artículo [1]

Las condiciones de contorno aplicadas son las mismas que en las figuras 5.4 de la página 29, siendo la carga de compresión aplicada en los lados paralelos al eje X de 30 kN y a su vez teniendo restringido el movimiento en el sentido del eje Z y todos los giros.

Los 19 casos que se modelizan con un tamaño de elemento de malla, alrededor del agujero de 0,00008 m. El número total de elementos del mallado, de cada caso, queda reflejado en la tabla 5.6.

| a/D | 1H | 2HT | 2HL | 2HD |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 1,5 | 41220 | 34849 | 52947 | 41006 |
| 2 | 41220 | 54264 | 77090 | 38876 |
| 2,5 | 41220 | 55631 | 45618 | 43772 |
| 3 | 41220 | 51398 | 55160 | 60500 |
| 3,5 | 41220 | 52016 | 65442 | 60920 |
| 4 | 41220 | 54688 | 69372 | 61880 |

Tabla 5.6: Número de elementos totales del mallado

Tras compilar los 19 casos, las concentraciones de tensiones obtenidas mediante las tensiones del programa, son las que refleja la tabla 5.7.

| a/D | 1H | 2HT | 2HL | 2HD |
|-----|---------|---------|---------|---------|
| 1,5 | 3,00749 | 3,35931 | 2,67954 | 3,38143 |
| 2 | 3,00749 | 3,16094 | 2,73784 | 3,29583 |
| 2,5 | 3,00749 | 3,13564 | 2,79354 | 3,21787 |
| 3 | 3,00749 | 3,14487 | 2,84437 | 3,17653 |
| 3,5 | 3,00749 | 3,16919 | 2,87799 | 3,15602 |
| 4 | 3,00749 | 3,21687 | 2,89315 | 3,15220 |

Tabla 5.7: Concentración de tensiones obtenidas con la simulación de Abaqus

Como se ve, el valor de la concentración de tensiones para el caso de un agujero coincide con el valor del Método analítico de Lekhnitskii, el cual está reflejado en la tabla 5.2 en la página 27.

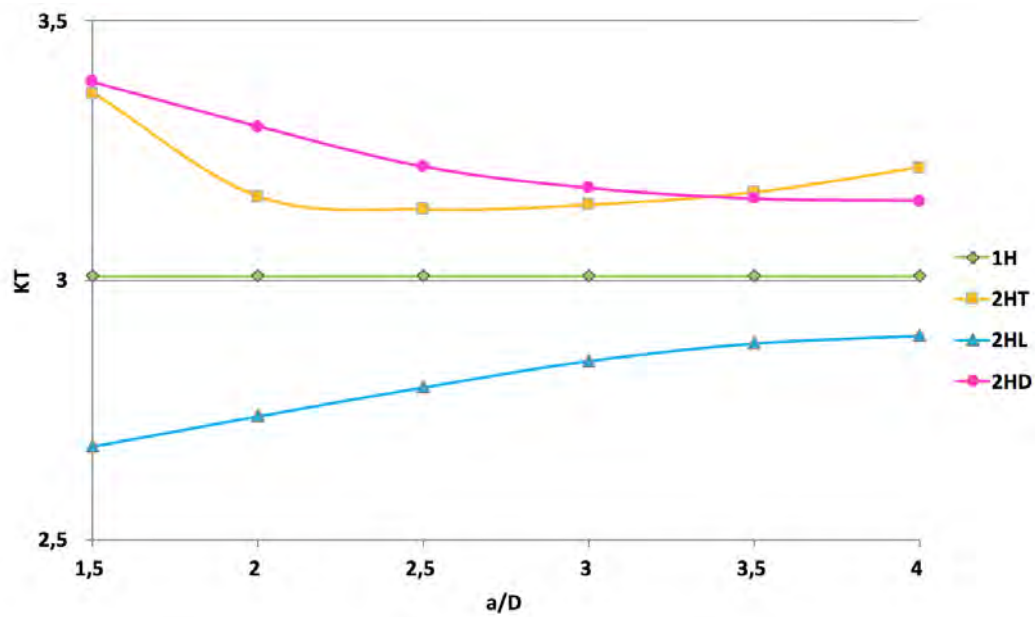


Figura 5.7: Concentración de tensiones frente a las diferentes configuraciones

Los resultados que aporta el artículo son los representados en la tabla 5.8 y la gráfica de la figura 5.8.

| a/D | 1H | 2HT | 2HL | 2HD |
|-----|---------|---------|---------|---------|
| 1,5 | 3,04054 | 3,68919 | 2,68919 | 3,58446 |
| 2 | 3,04054 | 3,43581 | 2,74662 | 3,47297 |
| 2,5 | 3,04054 | 3,33108 | 2,80743 | 3,37838 |
| 3 | 3,04054 | 3,40541 | 2,86486 | 3,34459 |
| 3,5 | 3,04054 | 3,50676 | 2,91892 | 3,32095 |
| 4 | 3,04054 | 3,57770 | 3,01689 | 3,29730 |

Tabla 5.8: Concentración de tensiones del artículo [1]

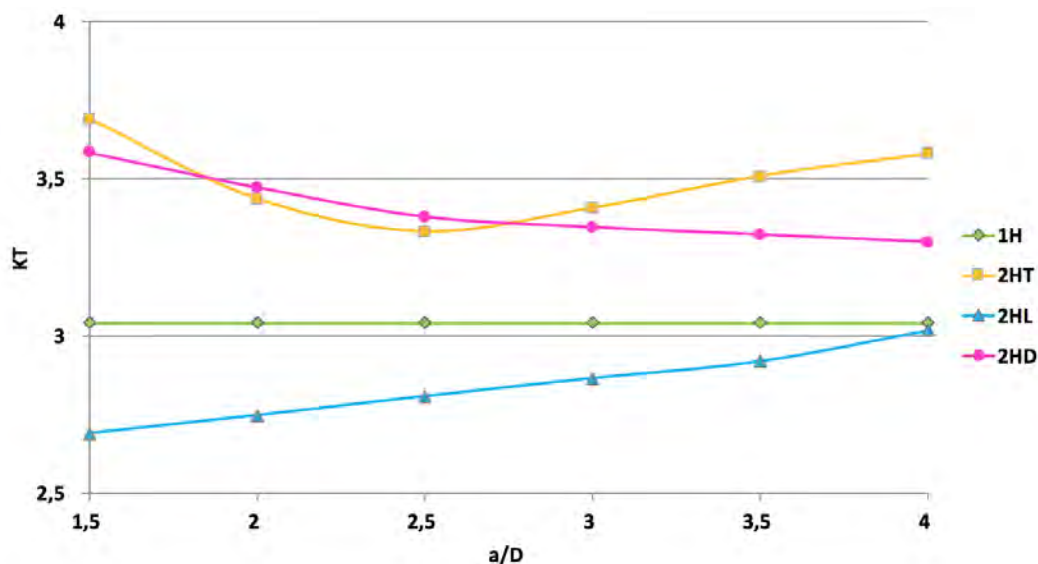


Figura 5.8: Concentración de tensiones frente a las diferentes configuraciones según el artículo

Como muestran las gráficas de las figuras 5.7 y 5.8 la tendencia y la forma de las gráficas de KT de los casos modelizados en Abaqus son similares que los casos del artículo. La tendencia de caso 2HL es de aumentar, el de 2HD de disminuir y el de 2HT de disminuir para luego aumentar.

* Es preciso indicar que en el artículo hay un factor de multiplicación, de dos, respecto a los resultados que se obtienen con el Método analítico de Lekhnitskii.

5.2.1. Análisis de la comprobación de placa con varios agujeros

Gracias a esta verificación se puede observar el comportamiento del factor de concentración de tensiones que muestran las placas ante una variación en su geometría.

A simple vista se observa que la separación entre los agujeros, tiene consecuencias opuestas según la disposición de agujeros que haya. Aumentando en un caso el KT , mientras que en otro es disminuido y en un tercero en el que existen ambos escenarios.

Para la configuración 2HT se tiene en el inicio una disminución en el valor de la variable y una remontada final del valor de esta. Aun así, el valor de la variable, no llegar a superar el valor inicial para un a/D de 1,5. En el rango en el cual la variable decrece, para cada 0,5 más que se añade al factor a/D KT se vuelve una valor medio de 0,98 veces el valor anterior. Mientras que en la zona de crecimiento el factor es de 1,01. Además, hay que destacar que el valor más pequeño del KT se obtiene para $a/D=2,5$ y el mayor para $a/D=1,5$, curiosamente para $a/D=2$ y $a/D=3,5$ el valor de la concentración de tensiones es prácticamente la misma. Por

otro lado, se ve que esta configuración, para todas sus variables, aumenta el valor de KT respecto al caso de monoagujero, el factor que tiene se encuentra en un rango de 1,12 a 1,04.

La configuración 2HL, por el contrario cuenta con una forma casi exponencial. La gráfica cuenta con un factor 1,02 veces el valor anterior por cada 0,5 incrementado en a/D , en el inicio hasta a el caso de $a/D=3,5$ en el que este factor se reduce 1,01. En esta configuración se observa una disminución de la concentración de tensiones para todas sus variantes. Hay que destacar que a medida que la separación entre agujeros aumenta, el valor de KT 2HL se hace más próximo al valor de la placa monoagujero, siendo el KT, para $a/D=1,5$, 0,89 veces el de 1H y el KT, para $a/D=4$, 0,94 veces el de 1H.

Finalmente, la configuración 2HD cuenta con una forma con tendencia a estabilizarse al rededor de un valor de 3, . En este caso, cada vez que la variable a/D es aumentada en 0,5 el factor que tenemos es de 0,99 veces el valor anterior. Por otra parte, el valor que se tiene para la concentración de tensiones de esta configuración frente a la configuración base, de una agujero, en mayor con un factor que va desde 1,12 veces para $a/D=1,5$ hasta 1,05 de la variación de $a/D=4$, así al igual que en el caso de 2HL, la separación de agujeros hace que la variable KT tienda a aproximarse al valor de KT del caso de un agujero.

Para la variable de la rigidez del plano en dirección del eje Y los resultados obtenidos a través del programa son los que figuran en la tabla 5.9 y la figura 5.9 .

| a/D | 1H | 2HT | 2HL | 2HD |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,5 | 11,13 | 11,06 | 11,09 | 11,04 |
| 2 | 11,13 | 11,06 | 11,08 | 11,05 |
| 2,5 | 11,13 | 11,06 | 11,08 | 11,06 |
| 3 | 11,13 | 11,06 | 11,07 | 11,06 |
| 3,5 | 11,13 | 11,06 | 11,07 | 11,06 |
| 4 | 11,13 | 11,06 | 11,07 | 11,06 |

Tabla 5.9: Rigidez en el plano en dirección de la carga frente a a/D (GPa)

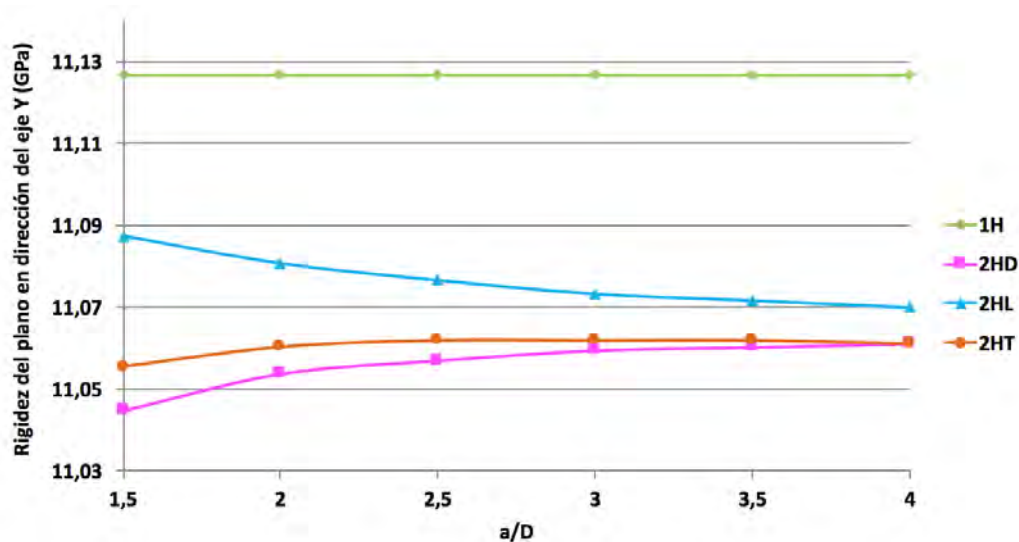


Figura 5.9: Rigidez en el plano en dirección de la carga para las diferentes configuraciones (GPa)

Como muestran los datos obtenidos, la variación entre los diferentes valores de la rigidez para una misma configuración son muy pequeños y casi despreciables. Se ve una tendencia de los tres caso biagujero a estabilizarse en un valor de 11,06 y 11,07, respectivamente. Vemos que el caso de dos agujeros en posición longitudinal la rigidez disminuye al aumentar la separación de estos, al contrario de lo que ocurre con las configuraciones 2HD y 2HT las cuales sufren un aumento de rigidez al aumentar la separación, es preciso observar que el aumento solamente es apreciable en los primeros valores de la variable a/D . Por otro lado las placas con configuración biagujero sufren una disminución de la rigidez frente al caso 1H, siendo 0,99 veces el valor del caso monoagujero.

Se puede resumir diciendo que si se busca una placa con baja concentración de tensiones se deberá recurrir a una configuración 2HL con las separación entre centros de agujeros mínima, mientras que si lo buscado es una placa con alta rigidez se deberá recurrir a una placa monoagujero. En el caso de que un segundo agujero sea necesario, la mejor opción, es de nuevo, 2HL con los agujeros más próximos posibles.

Influencia de la variación de la secuencia de apilamiento

Tras ver que el método de trabajo es fiable, se comienza el proyecto con la variación de la secuencia del apilamiento de la placa. Con ello se estudia como afecta, al factor de concentración de tensiones y la rigidez en el plano, el hecho de que sea variada la posición de las láminas y si estar juntas o separadas ciertas láminas con la misma dirección repercute o no.

Para el estudio se ha partido del laminado simétrico $[45/0/-45/90]_{2s}$ y se han realizado cuatro variaciones del mismo, obteniendo un total de cinco apilamientos diferentes. El número de capas se mantiene constantes para todos los laminados, siendo un total de 16 capas, y por consiguiente un espesor final de 3 mm. El apilamiento de partida queda reflejado en la figura 6.1 que se ve a continuación.

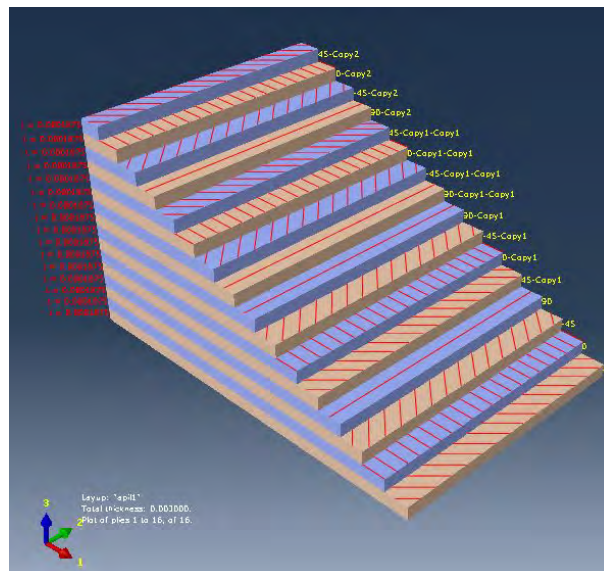
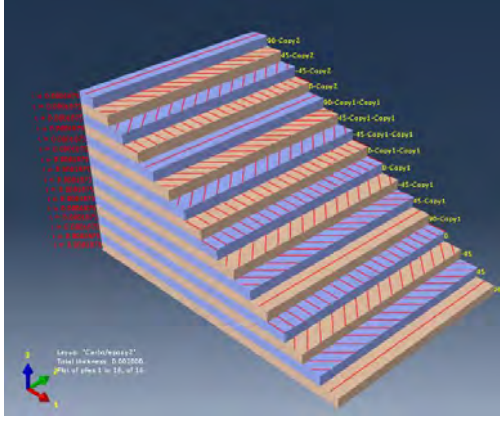


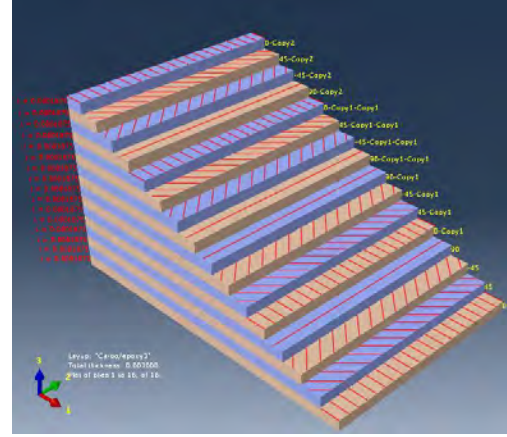
Figura 6.1: Apilamiento del laminado:
 $[45/0/-45/90]_{2s}$

Las cuatro variaciones de la secuencia del apilamiento 6.1, quedan reflejadas

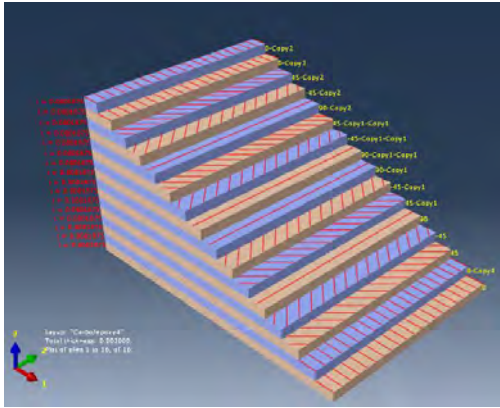
en las figuras 6.2. Estas variaciones son $[90/45/-45/0]_{2s}$, $[0/45/-45/90]_{2s}$, $[0_2/(45/-45/90)_2]_s$ y $[90_2/(45/-45/0)_2]_s$, donde las dos primeras solo sufren un cambio en el orden de las capas y en las dos restantes se añade a su vez una variación en la agrupación de las capas, siempre manteniendo la simetría de los apilamientos.



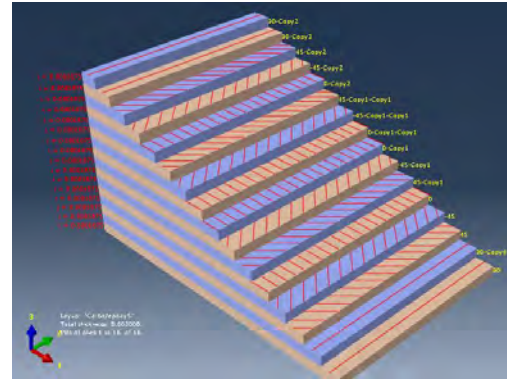
(a) Apilamiento del laminado:
 $[90/45/-45/0]_{2s}$



(b) Apilamiento del laminado:
 $[0/45/-45/90]_{2s}$



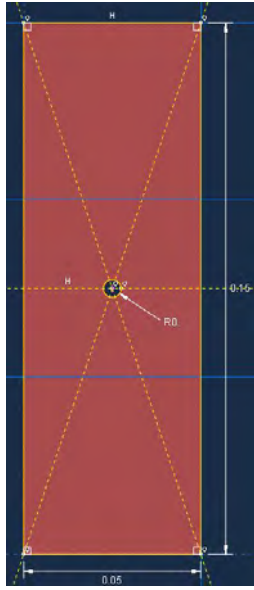
(c) Apilamiento del laminado:
 $[0_2/(45/-45/90)_2]_s$



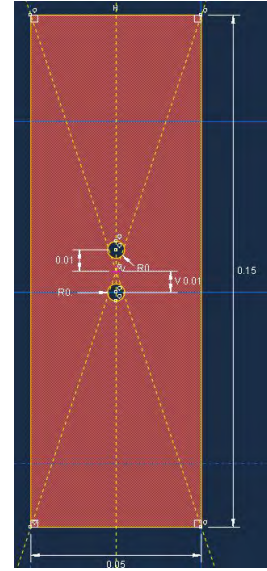
(d) Apilamiento del laminado:
 $[90_2/(45/-45/0)_2]_s$

Figura 6.2: Laminados con diferentes secuencias de apilamiento.

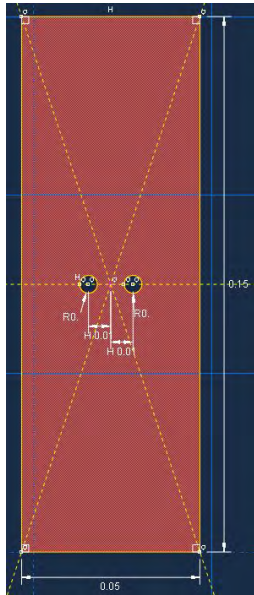
Las placas estudiadas son de 50 mm de ancho por 150 mm de largo, con un espesor de 3 mm. Los agujeros tiene un radio de 2,5 mm y una distancia entre centros de agujero de 12,5 mm. La fuerza está aplicada en los lados paralelos al eje X (quedando como eje de carga el eje Y), siendo de 15 kN a compresión en cada una y dichos lados tienen restringido el desplazamiento en sentido del eje Z y los giros en los tres ejes. Las configuraciones de placas en las cuales se realiza el estudio quedan reflejadas en las figuras 6.3.



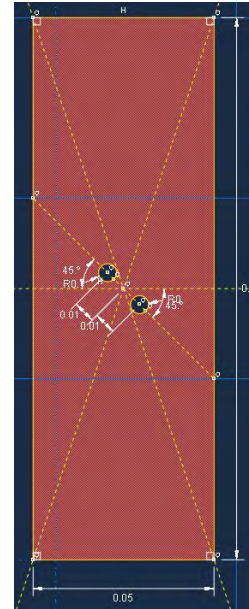
(a) Placa un agujero



(b) Placa dos agujeros en dirección longitudinal



(c) Placa dos agujeros en dirección transversal



(d) Placa dos agujeros en dirección diagonal

Figura 6.3: Configuraciones 1H, 2HL, 2HT y 2HD

Los casos se realizan con un tamaño de elemento de malla alrededor del agujero de 0,00008 m y un número total de elementos de 26736 para la placa 1H, 36504 para la placa 2HD, 49780 para la placa 2HT y 41009 para la placa 2HL.

Para los cinco laminados del estudio, los valores obtenidos para el factor de concentración de tensiones (KT) y la variable de rigidez en el plano en dirección del eje de carga, son los que refleja la tabla 6.1.

| | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|------------------|---------|---------|---------|---------|
| KT | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04363 |
| E_y^{pl} (GPa) | 31,341 | 31,062 | 31,140 | 31,088 |

Tabla 6.1: Concentración de tensiones y rigidez en el plano en dirección del eje de carga para los 5 laminados

Los resultados obtenidos muestran que solamente con la variación de la secuencia de apilamiento, no hay repercusión en los resultados. Ninguna variación existe en los valores de la concentración de tensiones, ni en los de la rigidez en el plano en dirección del eje Y.

Como se puede ver la variación de los valores solamente está entre la diferentes configuraciones de placa. La concentración de tensiones es menor en el caso de dos agujeros en sentido longitudinal, siendo 0,93 veces el valor de una placa monoagujero. Sin embargo, el caso de placa con dos agujeros diagonales y dos agujeros transversal el valor de la concentración aumenta, siendo 1,07 veces y 1,03 veces, respectivamente. Mientras que el caso de la rigidez en el plano en dirección del eje Y, siendo este el eje de carga, para las tres configuraciones de dos agujeros, esta se ve reducida respecto a la configuración de un agujero, siendo 0,99 veces la rigidez del caso de un agujero.

Influencia de la variación de las propiedades

Tras verificar en el apartado anterior que la variación en el orden de placas tiene una influencia nula, se prueba a variar los materiales de composición de las placas o en su defecto solamente una de las variables del material.

Las placas modelizadas son de 50 mm de ancho por 150 mm de largo, con un espesor de 3 mm, de nuevo. Los agujeros tiene un radio de 2,5 mm y una distancia entre centros de agujero de 12,5 mm. Las figuras 6.3 y ?? en las páginas 39 y ?? muestran los bosquejos de las cuatro configuraciones geométricas. La fuerza está aplicada en los lados paralelos al eje X, siendo unas fuerzas de 15 kN a compresión y así mismo dichos lados tienen restringido el desplazamiento en sentido del eje Z y los giros en los tres ejes.

El apilamiento con el que cuentan las placas es $[45/0/-45/90]_{2s}$, como muestra la figura 6.1 en la página 37.

Los casos se realizan con un tamaño de elemento de malla alrededor del agujero de 0,00008 m dando un número total de elementos de 26736 para la placa 1H, 36504 para la placa 2HD, 49780 para la placa 2HT y 41009 para la placa 2HL.

7.1. Variación de materiales

Se comienza variando el material del cual están formadas las placas, con los aspectos geométricos y las condiciones de contorno previamente descritos. Para ello, se reproduce cada placa con tres materiales diferentes, los valores de las propiedades de los materiales que las componen se han buscado muy alejados.

Los tres materiales elegidos son, un Carbono/Epoxi, un B(4)/N5505 y un Kevlar 49/Epoxi, cuyas propiedades quedan reflejadas en las siguientes tablas respectivamente, 7.1, 7.2 y 7.3.

| | |
|------------|----------|
| E_1 | 81,9 GPa |
| E_2 | 6,15 GPa |
| ν_{21} | 0,34 |
| ν_{12} | 0,0255 |
| G_{12} | 2,77 GPa |
| G_{13} | 2,77 GPa |
| G_{23} | 2,20 GPa |

Tabla 7.1: Propiedades del material Carbono/Epoxi[1]

| | |
|------------|----------|
| E_1 | 204 GPa |
| E_2 | 18,5 GPa |
| ν_{21} | 0,23 |
| ν_{12} | 0,02086 |
| G_{12} | 5,59 GPa |
| G_{13} | 5,59 GPa |
| G_{23} | 5,00 GPa |

Tabla 7.2: Propiedades del material B(4)/N5505[24]

| | |
|------------|----------|
| E_1 | 76,0 GPa |
| E_2 | 5,50 GPa |
| ν_{21} | 0,34 |
| ν_{12} | 0,0246 |
| G_{12} | 2,30 GPa |
| G_{13} | 2,30 GPa |
| G_{23} | 1,70 GPa |

Tabla 7.3: Propiedades del material Kevlar 49/Epoxi[24]

Los resultados obtenidos tras la modelización de los 12 casos quedan reflejados en las tablas 7.4 y 7.5 y sus respectivas gráficas 7.1 y 7.2.

| | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Carbono/epoxi | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04363 |
| B(4)/N5505 | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04364 |
| Kevlar 49/epoxi | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04364 |

Tabla 7.4: Concentración de tensiones para diferentes materiales



Figura 7.1: Concentración de tensiones para diferentes materiales

Se observa que la concentración de tensiones es igual para los tres materiales, no así para las cuatro configuraciones de placa. Se puede ver que dos de las configuraciones biagujero, concretamente 2HD y 2HT, aumentan el KT con respecto al valor de una placa con un solo agujero, siendo 1,1 y 1,03 veces el valor que se obtiene para una configuración 1H, respectivamente. La tercera configuración biagujero denominada 2HL por el contrario reduce el valor de KT siendo 0,9 veces el de la placa monoagujero.

| | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| Carbono/epoxi | 31,341 | 31,062 | 31,140 | 31,088 |
| B(4)/N5505 | 74,847 | 77,600 | 77,785 | 77,640 |
| Kevlar 49/epoxi | 28,885 | 28,626 | 28,692 | 28,648 |

Tabla 7.5: Rigidez en el plano en dirección de la carga para diferentes materiales (GPa)

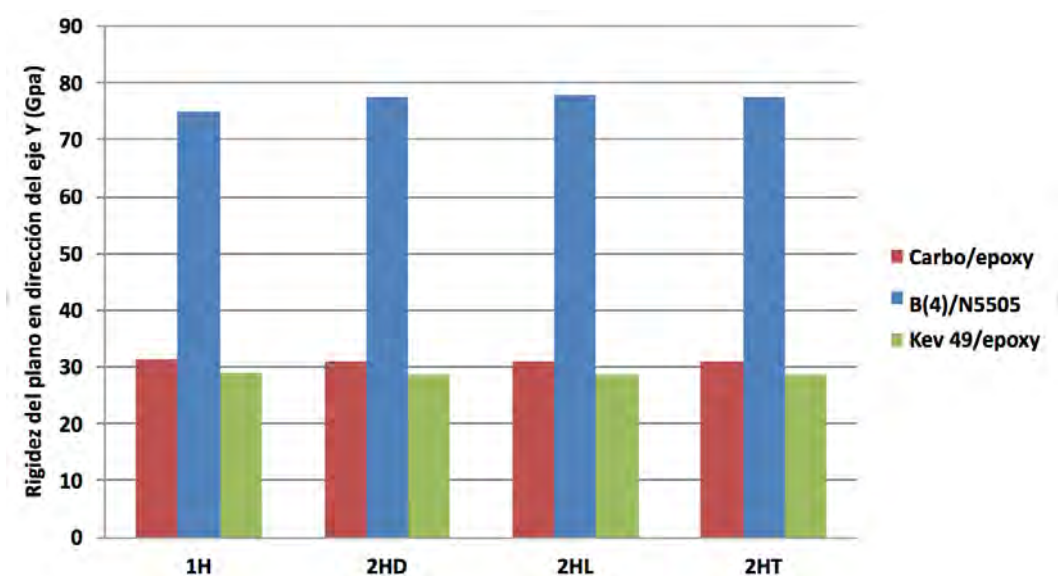


Figura 7.2: Rigidez en el plano en dirección de la carga para diferentes materiales

Al contrario de la variable de la concentración de tensiones, el parámetro rigidez del plano en dirección del eje Y se mantiene constante para cada material. Esto significa que la introducción de un segundo agujero no tiene efecto notable para esta variación del estudio. El material B(4)/N5505 con unas propiedades de mayor valor que el material Carbono/Epoxi tiene una rigidez al plano de 2,5 veces la de este. Por el contrario el material Kevlar 49/Epoxi con propiedades menores cuenta con una rigidez de 0,92 veces la del Carbono/Epoxi.

Se puede observar que la variación del material sólo afecta a la rigidez del plano en dirección del eje Y, es decir si se requiere tener una menor concentración de tensión en un determinado punto la opción de variar el material no aportará ningún cambio significativo. Así mismo se puede decir que si se introduce un segundo agujero, siguiendo las configuraciones estudiadas, nunca se verá afectada la rigidez del plano. Sin embargo, si el objetivo es la creación de una placa con mayor o menor rigidez se podrá optar a variar el material que la compone.

7.2. Variación de E_1 , E_2 y G_{12}

Para completar el estudio anteriormente realizado, en la sección anterior, en esta sección se ven variadas las tres propiedades principales de manera independiente. Así se puede ver su influencia de manera independiente y directa en las variables estudiadas, siendo la concentración de tensiones y la rigidez en el plano en dirección de la carga, eje Y.

Las propiedades de las que se parte para este estudio son las de la tabla 7.1 en la página 42, siendo un Carbono/Epoxi.

7.2.1. Variación de E_1

Se comienza con la variación del módulo de elasticidad en sentido longitudinal, E_1 . Para ello se estudia un rango que comprende valores de 25 GPa a 200 GPa. Este rango se elige tras observar listados de propiedades de materiales compuestos, consiguiendo así resultados con aplicación en casos reales.

| E_1 (GPa) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| 25 | 2,96696 | 2,93392 | 2,76350 | 3,04361 |
| 50 | 2,96697 | 3,16900 | 2,76351 | 3,04363 |
| 75 | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04363 |
| 81,9 ¹ | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04363 |
| 100 | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04364 |
| 125 | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04364 |
| 150 | 2,96699 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04364 |
| 175 | 2,96699 | 3,16903 | 2,76352 | 3,04364 |
| 200 | 2,96699 | 3,16903 | 2,76352 | 3,04364 |

Tabla 7.6: Concentración de tensiones para los diferentes valores de E_1

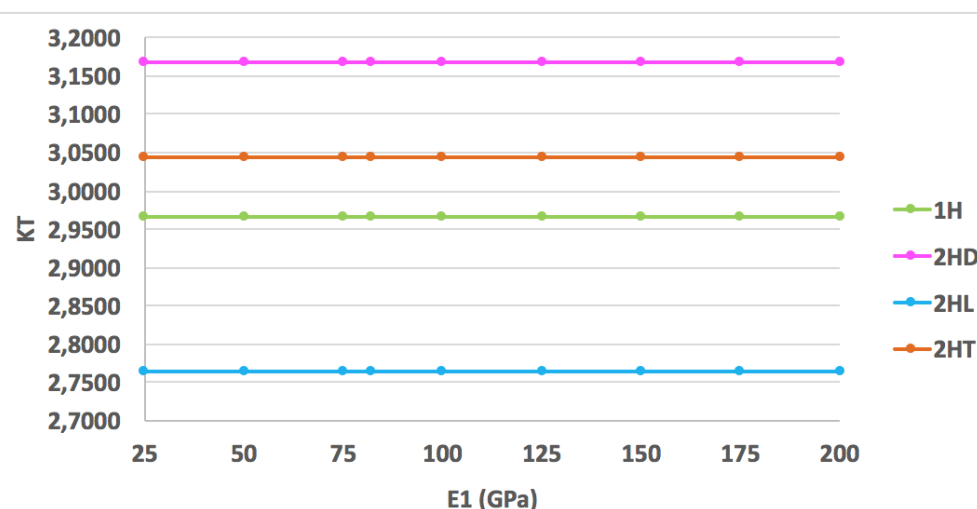


Figura 7.3: Concentración de tensiones para los diferentes valores de E_1

Como se ve en la tabla 7.6 y en la gráfica de la figura 7.3 el cambio de la variable E_1 no tiene ninguna repercusión significativa en KT, ya que hay que irse al quinto decimal para ver un cambio de valor. Por el contrario, al igual que en el estudio de la variación del apilamiento, se mantiene que el KT de las placas 2HD es 1,07 veces el de 1H, el de 2HL es 0,93 veces y el de 2HT es 1,03 veces el de 1H.

¹Valor de E_1 del material

| E_1 (GPa) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-------------|----------|----------|----------|-------|
| 25 | 12,56 | 12,45 | 12,48 | 12,46 |
| 50 | 19,92 | 20,62 | 20,67 | 20,63 |
| 75 | 29,06 | 28,81 | 28,88 | 28,82 |
| 81,9 | 31,34141 | 31,06233 | 31,13971 | 31,09 |
| 100 | 37,33 | 37,00 | 37,08 | 33,72 |
| 125 | 45,59 | 45,18 | 45,29 | 45,21 |
| 150 | 53,86 | 53,36 | 53,50 | 53,42 |
| 175 | 62,11 | 61,58 | 61,70 | 61,63 |
| 200 | 70,39 | 69,74 | 69,93 | 69,80 |

Tabla 7.7: Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de E_1 (GPa)

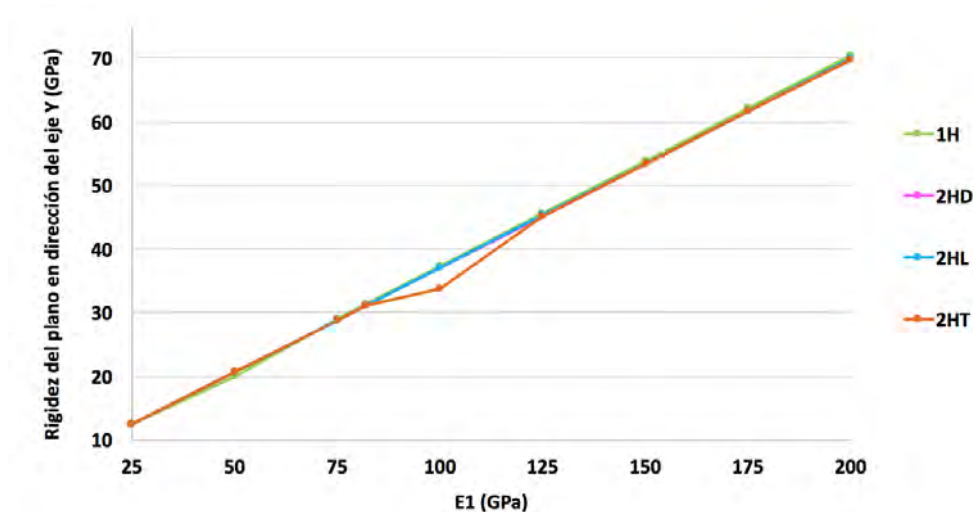


Figura 7.4: Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de E_1

Como muestran la tabla 7.7 y la gráfica de la figura 7.4, la rigidez del plano, por el contrario, sí se ve afectada por el cambio de la variable. Se observa que a medida que el valor de E_1 aumenta el valor de la rigidez también. Cada 25 GPa incrementados se ve un incremento de entre 1,1 y 1,7 del valor anterior, siendo el valor de 200 GPa 5,6 veces el valor del caso de 20 GPa. Se puede ver también que para todos los casos los valores de la rigidez para las diferentes configuraciones biagujero es prácticamente la misma que la de la configuración monoagujero, teniendo un factor de 0,99, menos la excepción del caso de $E_1 = 50 \text{ GPa}$ el cual es de 1,04.

7.2.2. Variación de E_2

La segunda variación que se lleva a cabo es la del módulo de elasticidad en sentido transversal, E_2 . Para ello se estudiará un rango que comprende valores desde 5 GPa hasta 20 GPa. Este rango, al igual que el de E_1 se elige tras observar listados de propiedades de materiales compuestos, consiguiendo así resultados con aplicación en casos reales.

| E_2 (GPa) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| 5 | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04363 |
| 6,15 ² | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04363 |
| 8 | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04364 |
| 10 | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04363 |
| 12 | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04363 |
| 14 | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04363 |
| 16 | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04363 |
| 18 | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04364 |
| 20 | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04363 |

Tabla 7.8: Concentración de tensiones para los diferentes valores de E_2

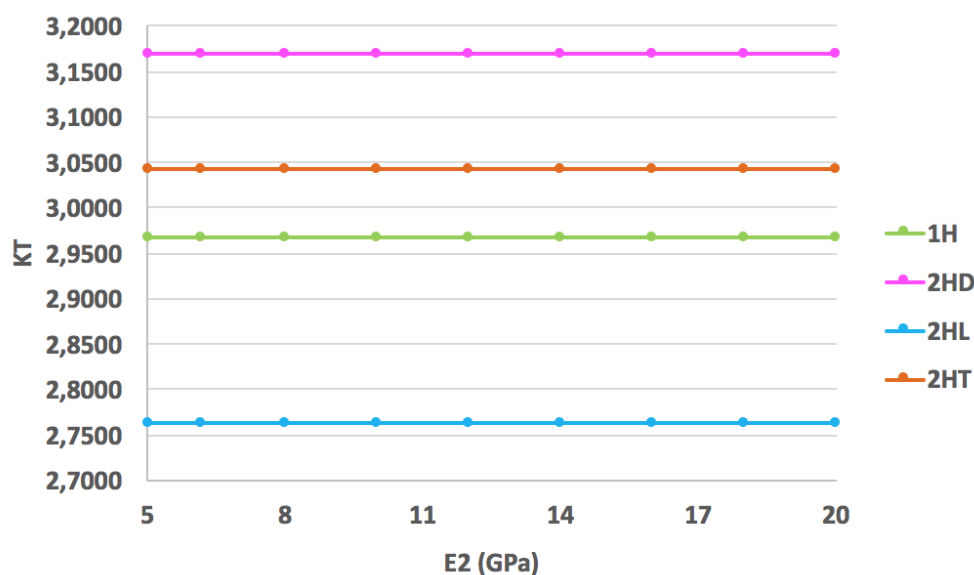


Figura 7.5: Concentración de tensiones para los diferentes valores de E_2

Al igual, que como pasa en el caso de E_1 , y como reflejan la tabla 7.8 y la gráfica de la figura 7.5 el cambio de la variable E_2 no tiene ninguna repercusión significativa en KT, ya que hay que irse, de nuevo, al quinto decimal para ver un cambio de

²Valor de E_2 del material

valor. Por el contrario, se sigue manteniendo, que el KT de las placas 2HD es 1,07 veces el de 1H, el de 2HL es 0,93 veces y el de 2HT es 1,03 veces el de 1H.

| E_1 (GPa) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-------------|-------|-------|-------|--------|
| 5 | 30,99 | 30,72 | 30,79 | 30,743 |
| 6,15 | 31,34 | 31,06 | 31,14 | 31,09 |
| 8 | 31,91 | 31,62 | 31,70 | 31,64 |
| 10 | 32,50 | 32,22 | 32,29 | 32,24 |
| 12 | 33,09 | 32,79 | 32,88 | 32,82 |
| 14 | 33,68 | 33,38 | 33,46 | 33,40 |
| 16 | 34,25 | 33,95 | 34,03 | 33,97 |
| 18 | 34,83 | 34,51 | 34,59 | 34,54 |
| 20 | 35,39 | 35,05 | 35,16 | 35,10 |

Tabla 7.9: Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de E_2 (GPa)

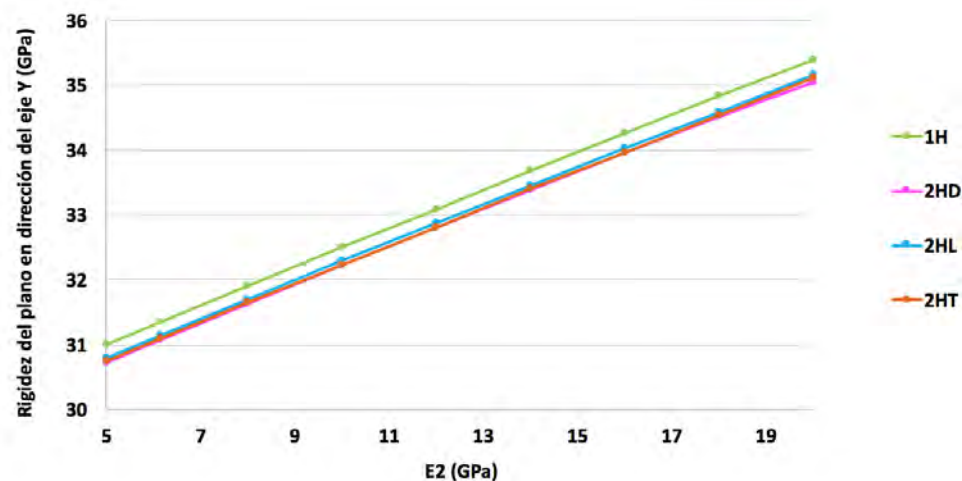


Figura 7.6: Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de E_2

Como muestran la tabla 7.9 y la gráfica de la figura 7.6, la rigidez en el plano si se ve afectada por el cambio de la variable. Se observa que a medida que el valor de E_2 aumenta, al igual que en el caso de E_1 , aumenta el valor de la rigidez. Cada 2 GPa incrementados se ve un incremento de 1,02 respecto al valor anterior de rigidez, siendo el valor de 20 GPa 1,14 veces el valor del caso de 5 GPa. Se puede ver también que para todos los casos los valores de la rigidez para las diferentes configuraciones biagujero es prácticamente las misma que la de la configuración monoagujero, teniendo un factor de 0,99.

7.2.3. Variación de G_{12}

Por último se varía el módulo a cortadura, G_{12} . El rango abarcado es de 2 GPa a 7 GPa. Al igual que en los módulos de elasticidad el rango es seleccionado tras revisar listados de propiedades en materiales compuestos.

| G_{12} (GPa) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| 2 | 2,96698 | 2,93392 | 2,76352 | 3,04363 |
| 2,77 ³ | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04363 |
| 3 | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04363 |
| 3,75 | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04363 |
| 4,5 | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04363 |
| 5,25 | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04363 |
| 6 | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04364 |
| 6,75 | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04363 |
| 7 | 2,96698 | 3,16902 | 2,76352 | 3,04363 |

Tabla 7.10: Concentración de tensiones para los diferentes valores de G_{12}

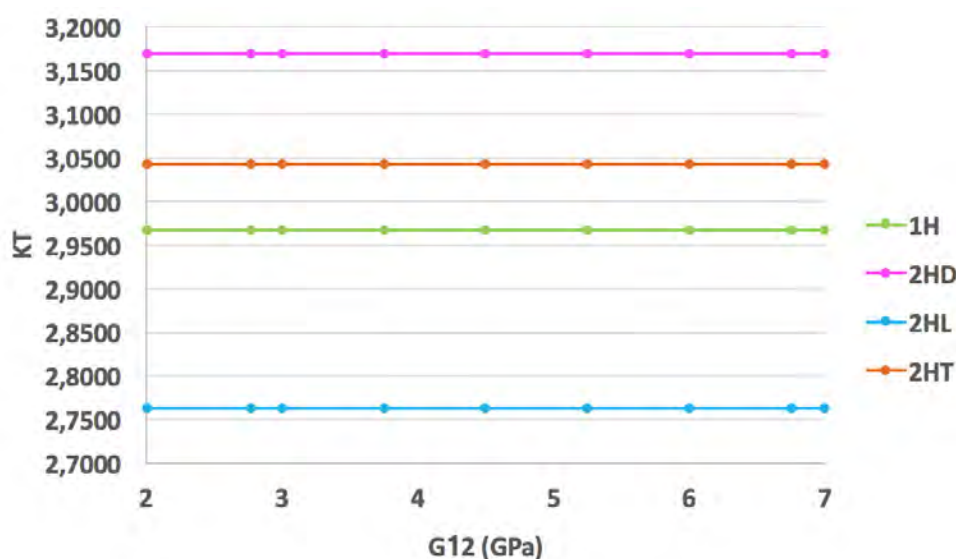


Figura 7.7: Concentración de tensiones para los diferentes valores de G_{12}

Como era de esperar, e igual que ocurre en los casos de E_1 y de E_2 y así como reflejan la tabla 7.10 y en la gráfica de la figura 7.7 el cambio de la variable G_{12} no tiene ninguna repercusión significativa en KT, ya que otra vez, hay que irse al quinto decimal para ver un cambio de valor. Sin embargo y de nuevo se mantiene que el KT de las placas 2HD es 1,07 veces el de 1H, el de 2HL es 0,93 veces y el de 2HT es 1,03 veces el de 1H.

³Valor de G_{12} del material

| E_1 (GPa) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 2 | 30,67 | 30,40 | 30,47 | 30,41 |
| 2,77 | 31,34 | 31,06 | 31,14 | 31,09 |
| 3 | 31,55 | 31,26 | 31,33 | 31,28 |
| 3,75 | 32,18 | 31,89 | 31,97 | 31,91 |
| 4,5 | 32,80 | 32,52 | 32,59 | 32,35 |
| 5,25 | 33,42 | 33,12 | 33,20 | 33,14 |
| 6 | 34,02 | 33,71 | 33,79 | 33,74 |
| 6,75 | 34,60 | 33,83 | 34,38 | 34,32 |
| 7 | 34,79 | 34,49 | 34,56 | 34,51 |

Tabla 7.11: Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de G_{12} (GPa)

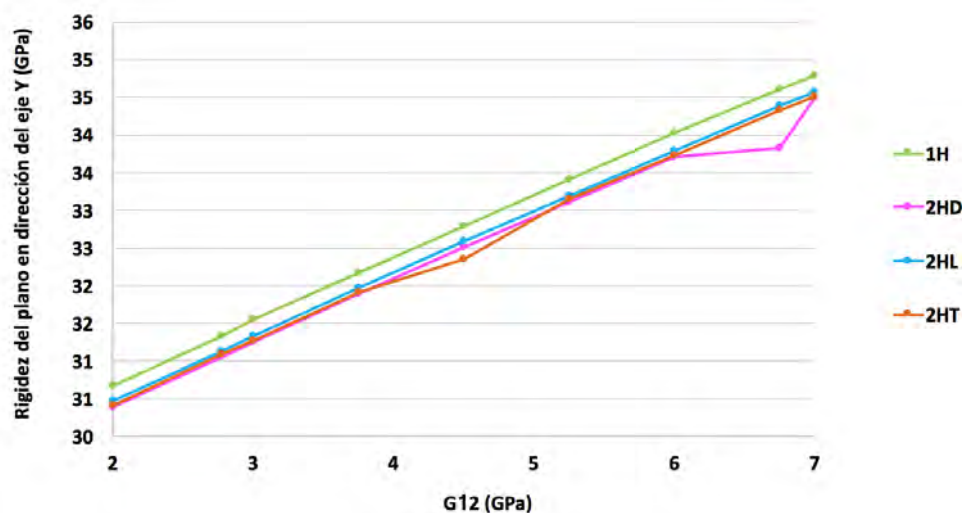


Figura 7.8: Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de G_{12}

Como muestran la tabla 7.11 y la gráfica de la figura 7.8, la rigidez en el plano si se ve afectada por el cambio de la variable. Se observa que a medida que el valor de G_{12} es incrementado, al igual que en los casos de E_1 y E_2 , aumenta el valor de la rigidez. Cada 0,75 GPa incrementados se ve un incremento de 1,02 respecto al valor anterior de rigidez, siendo el valor de 7 GPa es 1,13 veces el valor del caso de 2 GPa. Se puede ver también que para todos los casos los valores de la rigidez para las diferentes configuraciones biagujero es prácticamente las misma que la de la configuración monoagujero, teniendo un factor de 0,99.

Tras el estudio de las tres variables frente a la rigidez del plano se puede decir que a medida que las propiedades del materiales aumenta esta aumenta como ya reflejaba el apartado *Variación del material*, es por esto que si se busca un material con alta rigidez se debe recurrir a materiales con las propiedades más altas posibles.

Hay que saber que un segundo agujero reduce levemente la rigidez de la placa. Así mismo si solamente se puede seleccionar una propiedad se buscará que E_1 sea lo mayor posible, ya que a primera vista es la que más modifica a la rigidez.

Como tras el estudio de la variación de las tres propiedades no se ve ninguna diferencia relevante en las concentración de tensiones resultantes, se estudiarán los casos extremos y que a su vez son irreales de dos laminados unidireccionales. Para ver la influencia de E_1 se usará un apilamiento a 0° , con el mismo número de capas que el apilamiento de estudio anterior, es decir un total de 16 capas. Y para E_2 el apilamiento es a 90° con 16 capas.

Influencia de la variación en laminados unidireccionales

Los laminados unidireccionales son raramente usado en componentes estructurales pero usualmente combinados con capas de varias orientaciones en multidireccionales laminados. Aun así, es la capa a 0° la que soporta la mayoría de la carga aplicada, y desde el punto de vista del diseño estructural es importante conocer su comportamiento individual[17]. Para hacer el estudio más completo también se analizará el comportamiento de las capas de 90° por si mismas.

La configuración de placas se mantiene igual que en el apartado anterior, así mismo el número de elementos de los mallados y las condiciones de contorno y de carga, se mantiene constante.

8.1. Variación de E_1 para apilamiento 0°

Se comienza con la variación del módulo de elasticidad en sentido longitudinal, E_1 . Para ello se estudia un rango que comprende valores de 25 GPa a 200 GPa. Este rango se elige tras observar listados de propiedades de materiales compuestos, consiguiendo así resultados con aplicación en casos reales.

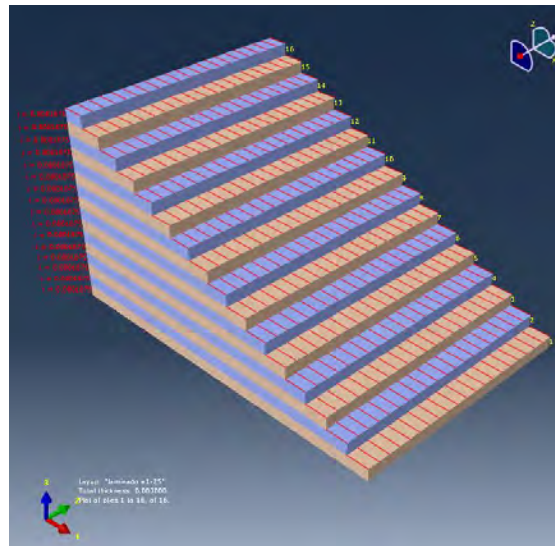


Figura 8.1: Apilamiento de la lamina

| E_1 (GPa) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-------------|---------|---------|---------|---------|
| 25 | 4,22060 | 4,69394 | 3,70856 | 4,33209 |
| 50 | 5,11781 | 5,74594 | 4,36126 | 5,25197 |
| 75 | 5,70389 | 6,43761 | 4,78493 | 5,87012 |
| 100 | 6,14355 | 6,95988 | 5,10108 | 6,33431 |
| 125 | 6,49590 | 7,38080 | 5,35363 | 6,70575 |
| 150 | 6,78997 | 7,73353 | 5,56402 | 7,01474 |
| 175 | 7,04234 | 8,03697 | 5,74438 | 7,27870 |
| 200 | 7,26339 | 8,30302 | 5,90231 | 7,50870 |

Tabla 8.1: Concentración de tensiones para los diferentes valores de E_1 en laminado unidireccional

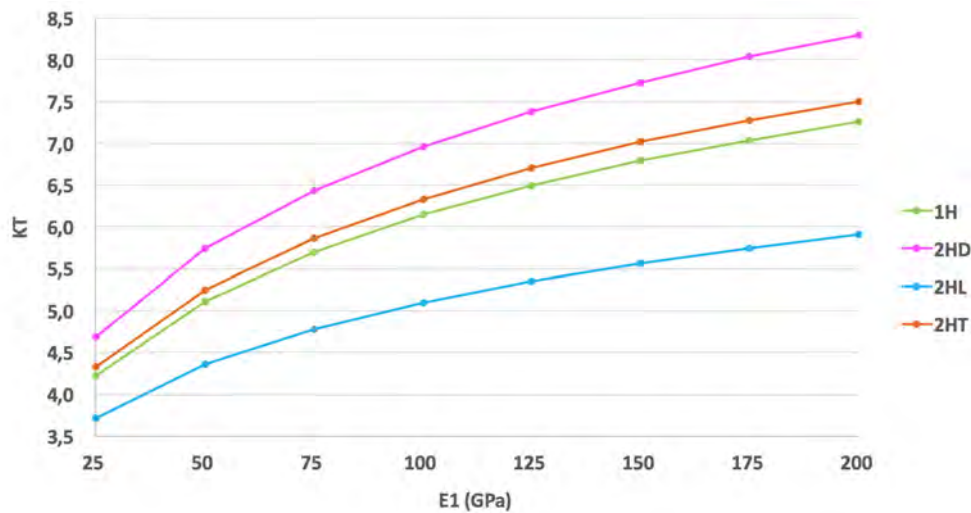


Figura 8.2: Variación de la concentración de tensiones para un apilamiento unidireccional a 0°

Como muestran la tabla 8.1 y la gráfica de la figura 8.2, el K_T se ve afectado por el cambio de la variable en el caso de uni-direccionalidad, al contrario de lo que ocurriría en el caso con multi-direccionalidad de lámina. Se observa que a medida que el valor de E_1 aumenta, el valor de la concentración de tensiones crece también. Cada 25 GPa incrementados se ve un incremento, que disminuye, de 1,1 a 1,03 respecto al valor anterior de K_T , siendo el valor de 20 GPa 1,45 veces el valor del caso de 5 GPa. Por otro lado al igual que en los estudios anteriores, se observa que la configuración 2HD tiene 1,1 veces el K_T de 1H, 2HT tiene 1,03 veces las de 1H y 2HL es la única configuración que disminuye la concentración siendo 0,9 veces la de concentración del caso 1H.

| E_1 (GPa) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| 25 | 24,63 | 24,25 | 24,39 | 24,27 |
| 50 | 48,81 | 47,66 | 48,12 | 47,92 |
| 75 | 72,53 | 70,36 | 71,29 | 71,02 |
| 100 | 95,86 | 92,48 | 93,91 | 93,70 |
| 125 | 118,78 | 114,10 | 116,04 | 116,14 |
| 150 | 141,32 | 135,28 | 137,72 | 138,25 |
| 175 | 163,52 | 156,07 | 158,97 | 160,10 |
| 200 | 185,37 | 176,55 | 179,81 | 181,64 |

Tabla 8.2: Rigidez en el plano en dirección de la carga para diferentes valores de E_1 en laminado unidireccional(0°)

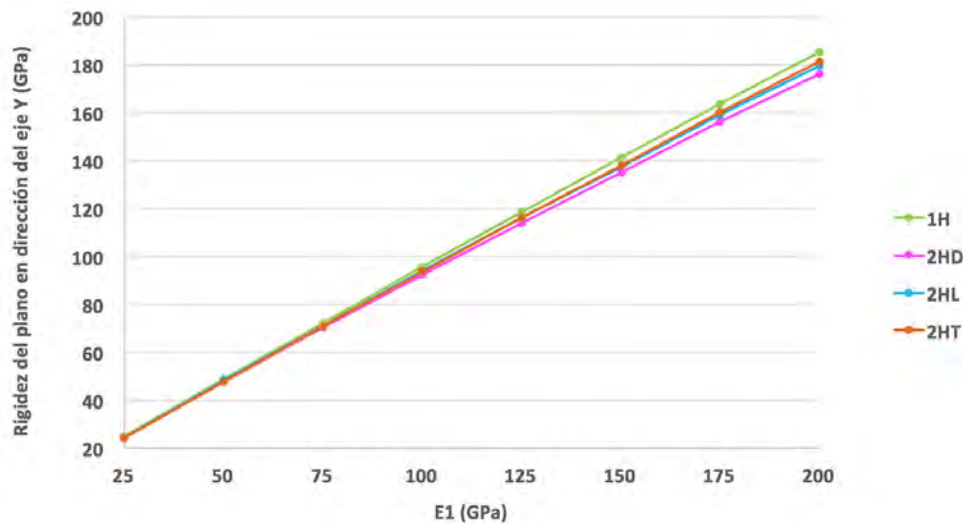


Figura 8.3: Variación de la rigidez en el plano en dirección de la carga para un apilamiento unidireccional a 0°

La tabla 8.2 y la gráfica de la figura 8.3 presentan como la rigidez del plano se ve afectada, igualmente, por el cambio de la variable. Se observa que a medida que el valor de E_1 aumenta, el valor de la concentración de tensiones crece también. Cada 25 GPa incrementados se ve un incremento, que disminuye, de 2 a 1,13 respecto al valor anterior de rigidez, siendo el valor de 200 GPa 7,4 veces, de media, el valor del caso de 25 GPa. Se puede ver también que para todos los casos los valores de la rigidez para las diferentes configuraciones biagujero es prácticamente las misma que la de la configuración monoagujero, teniendo un factor de 0,98.

8.2. Variación de E_2 para apilamiento 90°

La segunda variación que se lleva a cabo es la del módulo de elasticidad en sentido transversal, E_2 . Para ello se estudiará un rango que comprende valores desde 5 GPa hasta 20 GPa. Este rango, al igual que el de E_1 se elige tras observar listados de propiedades de materiales compuestos, consiguiendo así resultados con aplicación en casos reales.

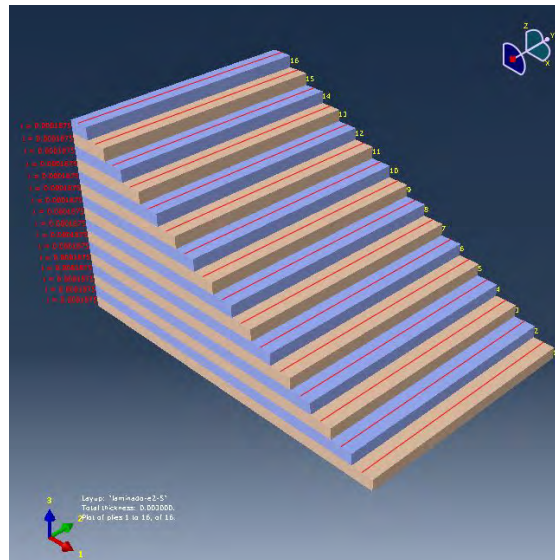


Figura 8.4: Apilamiento de la lamina

| E_2 (GPa) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-------------|---------|---------|---------|---------|
| 5 | 2,49741 | 2,59112 | 2,36517 | 2,58611 |
| 8 | 2,81687 | 2,94069 | 2,62719 | 2,90985 |
| 10 | 2,99180 | 3,13190 | 2,76735 | 3,08776 |
| 12 | 3,14667 | 3,30190 | 2,88977 | 3,24555 |
| 14 | 3,28628 | 3,48123 | 2,99896 | 3,38799 |
| 16 | 3,41381 | 3,63347 | 3,09782 | 3,51823 |
| 18 | 3,53145 | 3,77371 | 3,18837 | 3,63848 |
| 20 | 3,64082 | 3,90390 | 3,27204 | 3,75036 |

Tabla 8.3: Concentración de tensiones para los diferentes valores de E_2 en laminado unidireccional

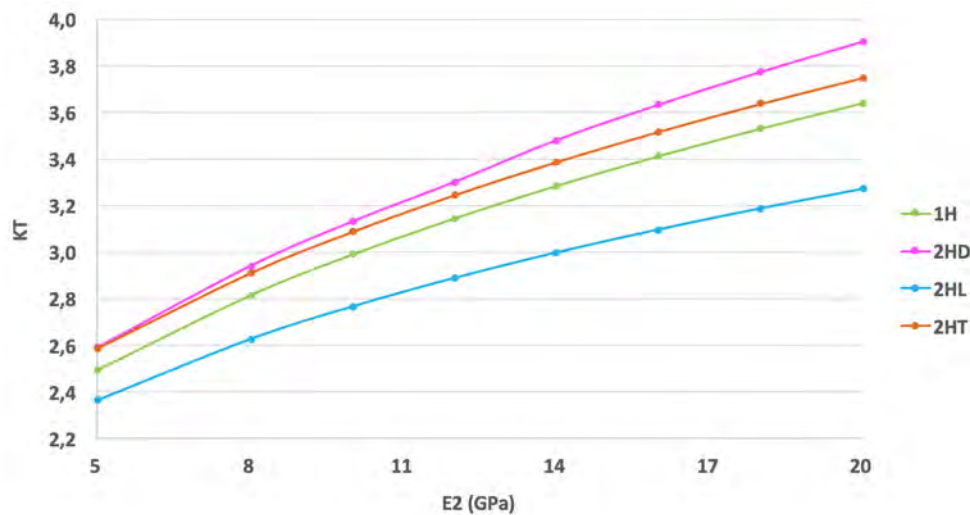


Figura 8.5: Variación de la concentración de tensiones para un apilamiento unidireccional a 90°

Como refleja la tabla 8.3 y la gráfica de la figura 8.5, el KT se ve afectado por el cambio de la variable, como para el caso unidireccional a 0° . Se observa que a medida que el valor de E_2 aumenta, el valor de la concentración de tensiones crece también. Cada 2 GPa incrementados se ve un incremento, que disminuye, de 1,2 a 1,03 respecto al valor anterior de KT , siendo el valor de 200 GPa 1,72 veces el valor del caso de 25 GPa. Por otro lado al igual que en los estudios anteriores, se observa que la configuración 2HD tiene 1,1 veces el KT de 1H, 2HT tiene 1,03 veces las de 1H y 2HL es la única configuración que disminuye la concentración siendo 0,8 veces la de concentración del caso 1H.

| E_2 (GPa) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 5 | 4,97 | 4,93 | 4,94 | 4,93 |
| 8 | 7,93 | 7,87 | 7,89 | 7,87 |
| 10 | 9,92 | 9,83 | 9,85 | 9,83 |
| 12 | 11,89 | 11,78 | 11,81 | 11,79 |
| 14 | 13,87 | 13,72 | 13,76 | 13,73 |
| 16 | 15,84 | 15,67 | 15,72 | 15,68 |
| 18 | 17,81 | 17,60 | 17,66 | 17,62 |
| 20 | 19,77 | 20,76 | 19,61 | 19,56 |

Tabla 8.4: Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes valores de E_2 en laminado unidireccional

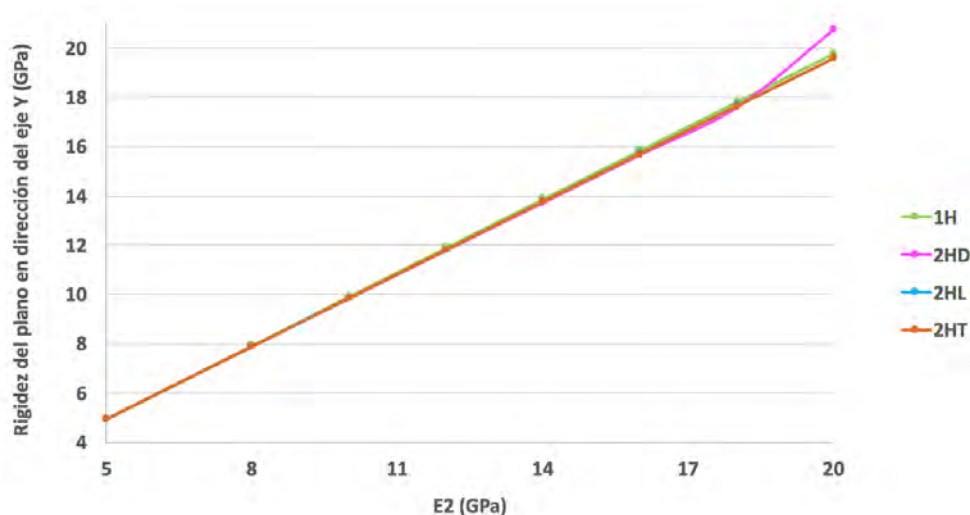


Figura 8.6: Variación de la rigidez en el plano en dirección de la carga para un apilamiento unidireccional a 90°

La tabla 8.4 y la gráfica de la figura 8.6 muestran como la rigidez del plano se ve afectada, igualmente, por el cambio de la variable. Se observa que a medida que el valor de E_2 aumenta, el valor de la concentración de tensiones crece también. Cada 2 GPa incrementados se ve un incremento, que disminuye, de 1,6 a 1,11 respecto al valor anterior de rigidez, siendo el valor de 20 GPa 4 veces, de media, el valor del caso de 5 GPa. Se puede ver también que para todos los casos los valores de la rigidez para las diferentes configuraciones biagujero es prácticamente las misma que la de la configuración monoagujero, teniendo un factor de 0,99.

Tras este análisis se puede ver que si se precisa una placa con alta rigidez deberemos recurrir a materiales con propiedades altas mientras que si se necesita placas con baja concentración de tensiones se deberá recurrir a materiales con propiedades bajas. Así mismo el introducir un segundo agujero reducirá la rigidez, sin depender la posición relativa de ambos, mientras que el KT podrá ser reducido incluyendo un segundo agujero, mediante la configuración 2HL.

Hay que remarca que el KT aumenta con una tendencia parecida a una función exponencial, mientras que el crecimiento de la rigidez tiene un comportamiento casi lineal. Pudiendo ser este el motivo de que ante la variación del material en un laminado multi-direccional el efecto de este cambio sea solamente perceptible en la rigidez y no así en la concentración de tensiones.

Capítulo 9

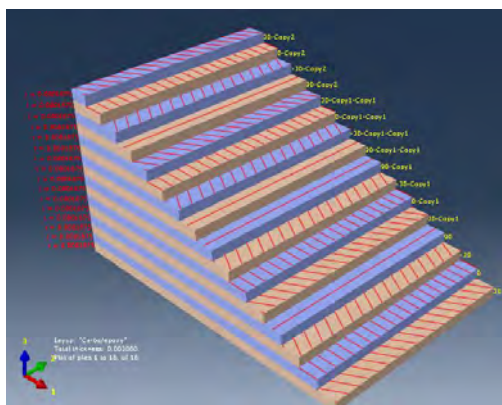
Influencia de la variación orientación

Este apartado va a consistir en la variación sobre la orientación de las fibras de las láminas. Hasta ahora se ha trabajado con un laminado $[45/0/-45/90]_{2s}$, ahora se buscará ver que ocurre y cual es el comportamiento final de la placa, si hay otras orientaciones, como puede ser 30° o 50° en vez de 45° o si sólo tenemos laminados con capas a 0° y 90° .

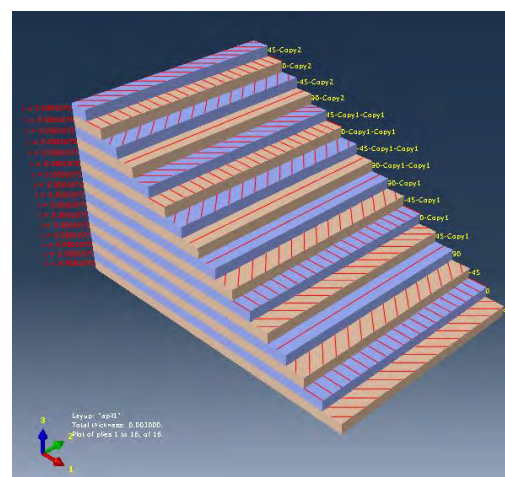
Las dimensiones de la placa y las condiciones de contorno, que se usan para este apartado son las mismas descritas en el inicio del apartado 6 *Variación del apilamiento*.

Los casos se realizan con un tamaño de elemento de malla alrededor del agujero de 0,00008 m, generando un número total de elementos de 26736 para la placa 1H, 36504 para la placa 2HD, 49780 para la placa 2HT y 41009 para la placa 2HL.

Las orientaciones que se han estudiado son:

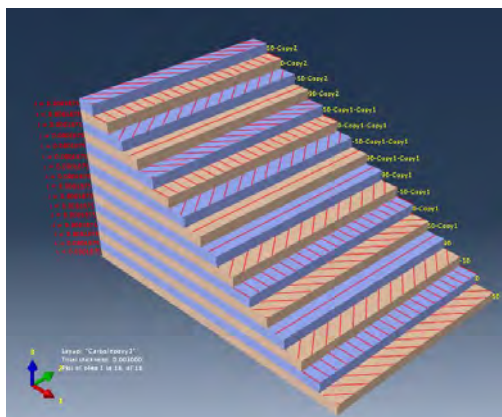


(a) Apilamiento del laminado:
 $[30/0/-30/90]_{2s}$

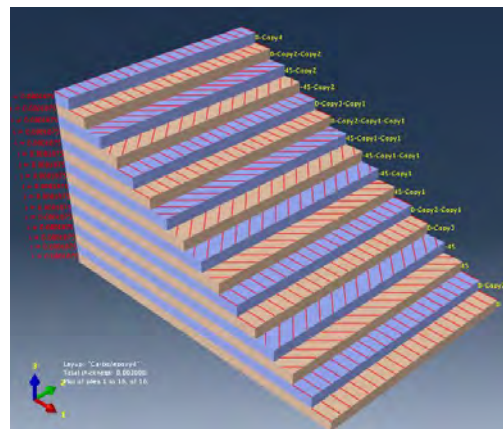


(b) Apilamiento del laminado:
 $[45/0/-45/90]_{2s}$

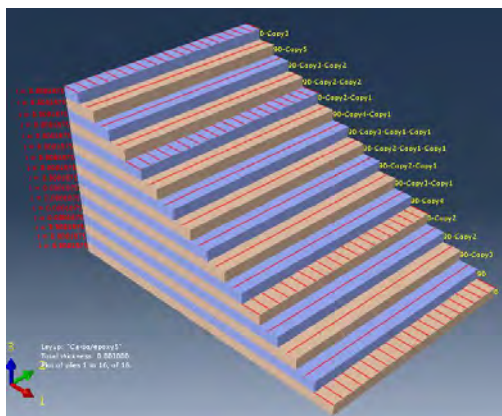
Figura 9.1: Laminados con diferentes orientaciones de capa



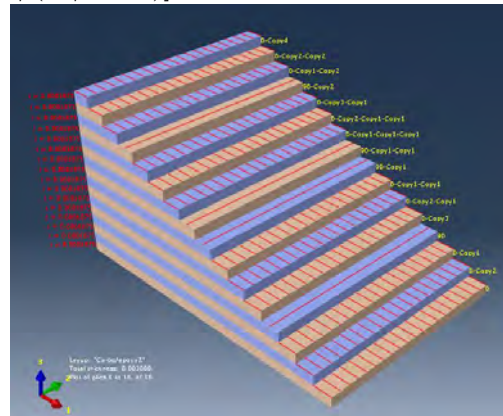
(a) Apilamiento del laminado:
 $[50/0/-50/90]_{2s}$



(b) Apilamiento del laminado:
 $[0_2/(45/-45)]_{2s}$



(c) Apilamiento del laminado:
 $[0/90_3]_{2s}$



(d) Apilamiento del laminado:
 $[0_3/90]_{2s}$

Figura 9.2: Laminados con diferentes orientaciones de capa

En la tabla 9.1 y su gráfica correspondiente de la figura 9.3 que quedan a continuación reflejadas se recogen los valores de la concentración de tensiones.

| Laminados | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|
| $[30/0/-30/90]_{2s}$ | 3,44814 | 3,74204 | 3,14162 | 3,53593 |
| $[45/0/-45/90]_{2s}$ | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04363 |
| $[50/0/-50/90]_{2s}$ | 2,90516 | 3,04167 | 2,71330 | 2,98116 |
| $[0_2/(45/-45)]_{2s}$ | 3,41424 | 3,76979 | 3,11679 | 3,49876 |
| $[0/90_3]_{2s}$ | 3,93361 | 4,25660 | 3,49389 | 4,04802 |
| $[0_3/90]_{2s}$ | 5,22496 | 5,81113 | 4,47964 | 5,36728 |

Tabla 9.1: Concentración de tensiones para los diferentes laminados

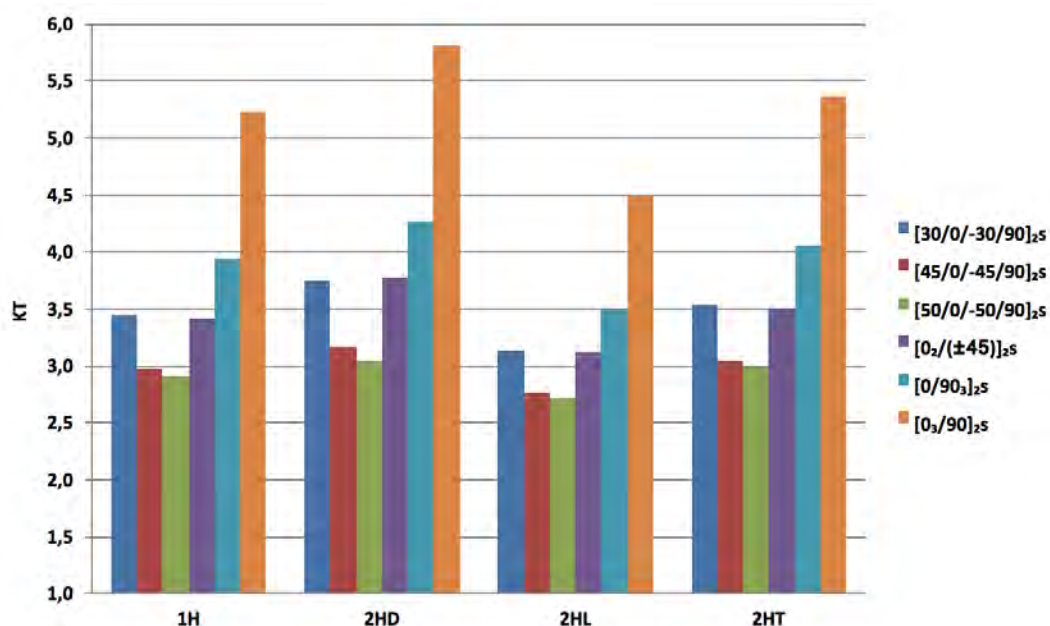


Figura 9.3: Concentración de tensiones para los diferentes laminados

Como queda reflejado en la tabla 9.1 y en la gráfica de la figura 9.3 para cada laminado la concentración de tensiones se ve afectada tanto por el laminado como por la configuración geométrica de la placa.

Se puede ver una correlación entre las configuraciones geométricas sin importar el laminado, es decir, las placas con configuración 2HD siempre tienen un KT 1,1 veces el KT de las placas 1H, las placas 2HL tienen un KT 0,9 veces el KT de una placa 1H y para la configuración 2HT el valor de KT es 1,03 veces la KT de una placa 1H. Con esto se podría decir que si se desea reducir la concentración de tensiones una opción es introducir un segundo agujero en la dirección de la fuerza aplicada, por el contrario si lo que se busca es aumentar el KT la opción sería recurrir a introducir un segundo agujero en sentido transversal a la carga o a 45°.

Se observa también que para los tres primeros laminados, los cuales tienen un apilamiento similar, [30/0/ - 30/90]_{2s}, [45/0/ - 45/90]_{2s} y [50/0/ - 50/90]_{2s}, respectivamente, la concentración de tensiones se ve reducida a medida que los ángulos de las capas impares aumenta. Aun así no hay una correlación directa, aparentemente, entre el número de grados aumentados y el KT disminuido.

En el caso de los otros tres laminados se puede ver el valor de KT aumenta 1,1-1,2 veces del laminado [0₂/(45/ - 45)]_{2s} al laminado [0/90₃]_{2s} y de 1,3-1,4 veces del laminado [0/90₃]_{2s} al laminado [0₃/90]_{2s}, sin tener una diferencia relevante entre las distintas configuraciones geométricas.

| Laminados | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| $[30/0/-30/90]_{2s}$ | 43,747 | 43,253 | 43,415 | 43,228 |
| $[45/0/-45/90]_{2s}$ | 31,341 | 31,062 | 31,140 | 31,088 |
| $[50/0/-50/90]_{2s}$ | 28,824 | 28,577 | 28,637 | 28,593 |
| $[0_2/(45/-45)]_{2s}$ | 45,970 | 45,496 | 45,634 | 45,537 |
| $[0/90_3]_{2s}$ | 24,900 | 24,558 | 24,671 | 24,598 |
| $[0_3/90]_{2s}$ | 61,678 | 60,120 | 60,729 | 60,616 |

Tabla 9.2: Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes laminados

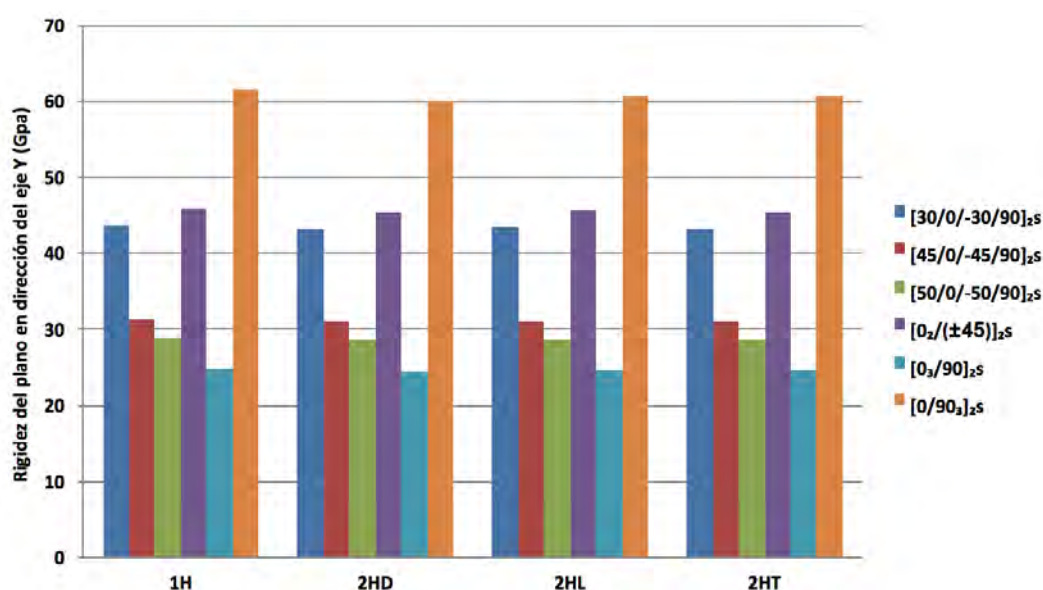


Figura 9.4: Rigidez en el plano en dirección de la carga para los diferentes laminados

Como queda reflejado en la tabla 9.2 y en la gráfica de la figura 9.4 para cada laminado la rigidez se mantiene prácticamente constante. Se puede ver una correlación en la cual las placas con configuración 2HD, 2HL y 2HT es para todos los laminados 0,99 veces el valor de la configuración 1H. Así se puede decir que para un mismo laminado la rigidez se ve levemente reducido al introducir un segundo agujero en la placa.

Por otro lado se aprecia que para los tres primeros laminados, $[30/0/-30/90]_{2s}$, $[45/0/-45/90]_{2s}$ y $[50/0/-50/90]_{2s}$, respectivamente, a medida que los ángulos de las capas impares se hacen mayores la rigidez se hace menor. Así se puede ver que la rigidez para el laminado $[45/0/-45/90]_{2s}$ es de 0,72 veces la rigidez del laminado $[30/0/-30/90]_{2s}$ y la rigidez del laminado $[50/0/-50/90]_{2s}$ es 0,66 veces la rigidez del laminado $[30/0/-30/90]_{2s}$ y 0,92 veces la rigidez del laminado $[45/0/-45/90]_{2s}$. Por el contrario no se puede ver una correlación exacta para cada grado aumentado ya que en el primer caso para 15° es 0,72 veces y en el segundo caso 5° tienen una constante de 0,92 veces. Se puede decir que si se tiene

como objetivo aumentar la rigidez de la placa una opción será disminuir el valor de los ángulos de las capas impares.

Finalmente respecto a los laminados $[0_2/(45/-45)]_{2s}$, $[0/90_3]_{2s}$ y $[0_3/90]_{2s}$ se puede ver que a medida que aumentamos el número de capas en dirección de aplicación de la carga el valor de la rigidez en el plano en dirección del eje Y aumenta.

Curiosamente el laminado $[30/0/-30/90]_{2s}$ y el laminado $[0_2/(45/-45)]_{2s}$ tienen unos valores, prácticamente iguales, de concentración de tensiones y de rigidez en el plano en dirección de carga. El factor que los relaciona los valores de KT de los dos laminados es de 0,99, menos en el caso de la configuración 2HD que es de 1,01, lo que es un factor medio de 0,995. Así mismo el valor de la rigidez tiene un factor de 1,05 para todos las configuraciones.

Curiosamente, se observa que al enfrentar los resultados del laminado $[45/0/-45/90]_{2s}$ con los correspondientes al laminado $[0_2/(45/-45)]_{2s}$, vemos que al sustituir una lamina a 90° por una a 0° su rigidez del plano aumenta, de igual manera ocurre con la variable KT. Se puede asegurar esto a pesar de que las laminas ocupen diferentes posiciones ya que el apartado *Influencia de la variación de la secuencia de apilamiento* se ve claramente que para un mismo laminado variar la secuencia del apilamiento no crea variación en el resultado.

Singularmente las dos gráficas de las figuras 9.3 y 9.4 sus barras tiene calcado el comportamiento, menos en el caso del laminado $[0/90_3]_{2s}$ el cual cuenta con la rigidez de menos valor de todos los laminados, pero no así su concentración de tensiones, la cual es la segunda de mayor valor.

Capítulo 10

Influencia de la variación del tamaño de agujero

En este último apartado de este proyecto se estudia como se ve afectada las condiciones de la placa si pierde la simetría en su geometría, para ello se varía el diámetro de uno de los dos agujeros que la placa contiene.

Las condiciones de contorno y de carga se mantienen igual, que en los estudios previos. Se restringe los giros en todas las direcciones y los desplazamientos en dirección del eje Z en los bordes de la placa paralelos al eje X. La fuerza es de 15 kN a compresión y se encuentra aplicada en los bordes de placa paralelos al eje X. Siendo el eje Y el eje de carga para el estudio.

La configuración básica de placa es de ancho 50 mm, largo 150 mm y espesor de 3 mm, las placas cuentan con 16 capas con un apilamiento $[45/0/-45/90]_{2s}$. La separación entre centros de agujero, se mantiene constante para todo el estudio, es de 12,5 mm, el agujero de diámetro constante es de 5 mm. El material del cual están compuestas se trata de un Carbono/Epoxi con las propiedades de la tabla 7.1 que se encuentra en la página 42

Las placas con las variaciones de diámetro quedan representadas en las figuras 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5 y 10.6.

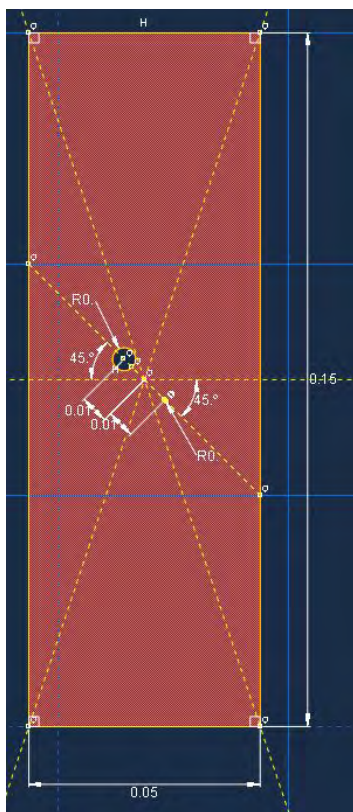
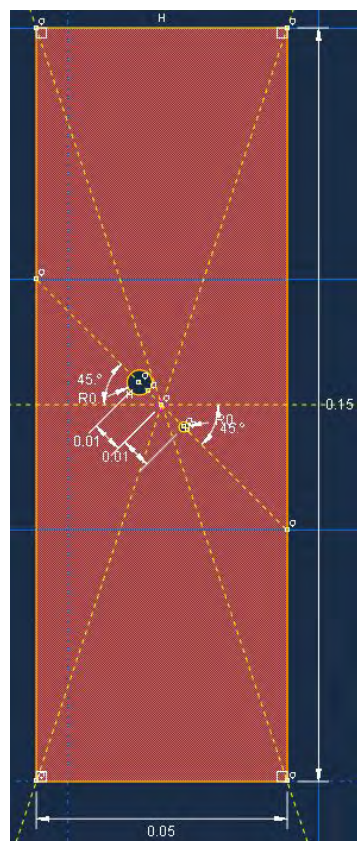
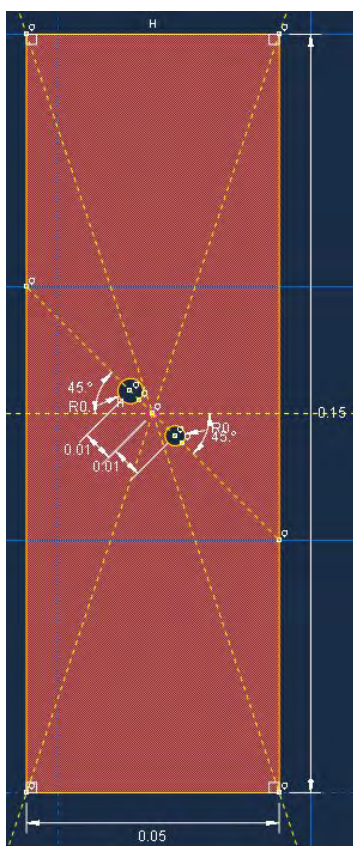
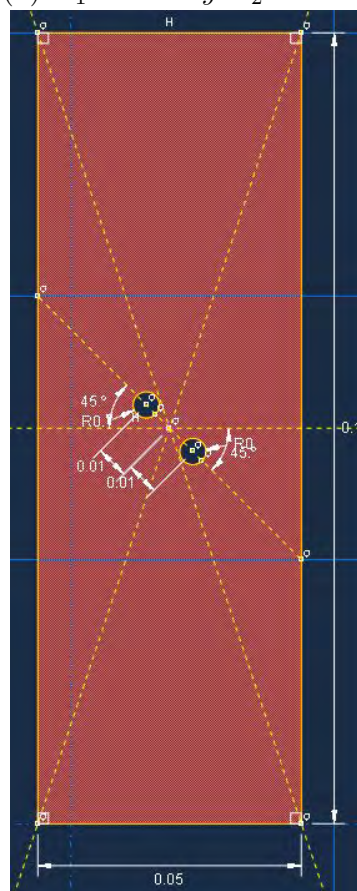
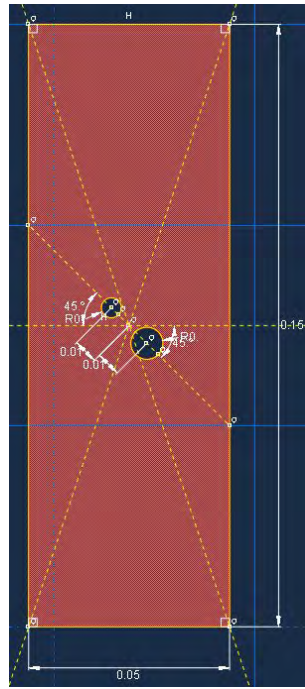
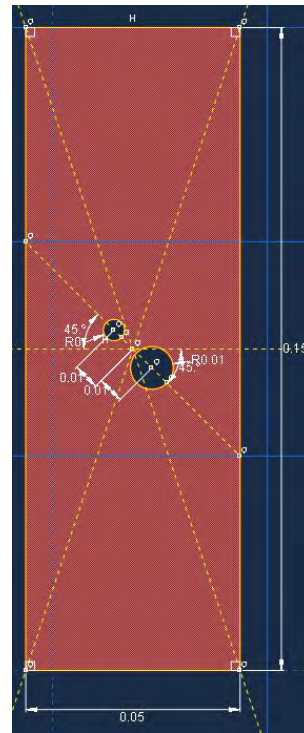
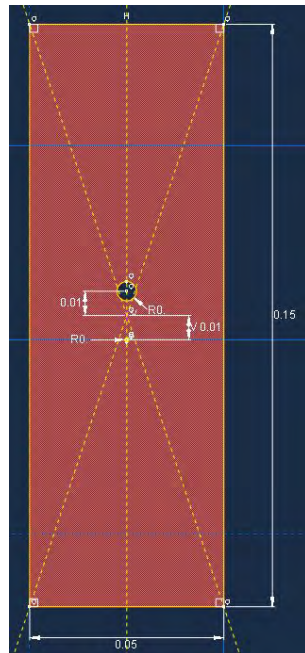
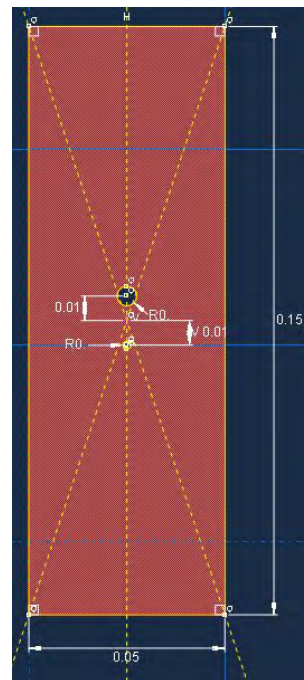
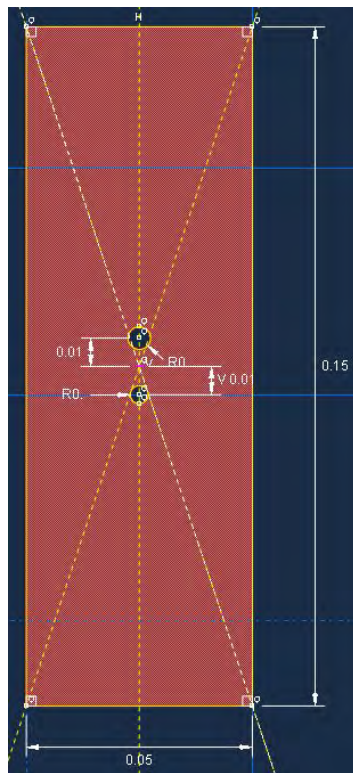
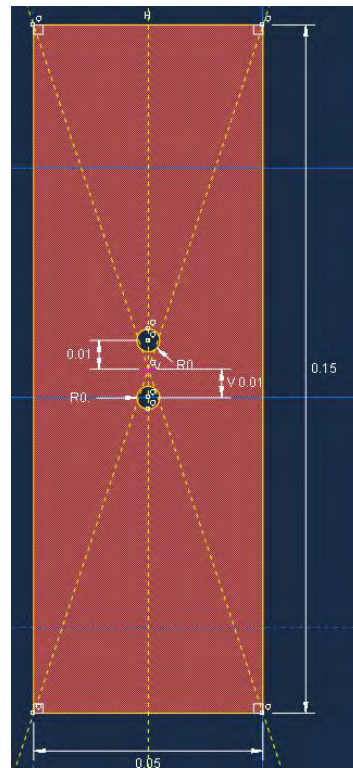
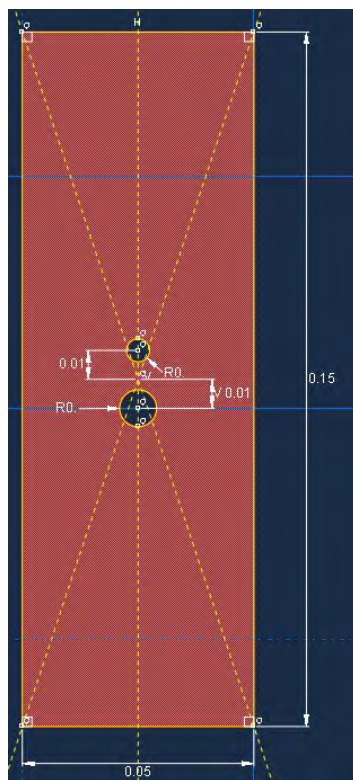
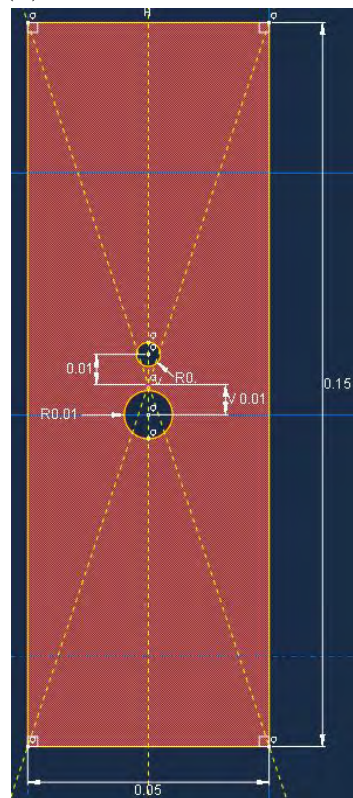
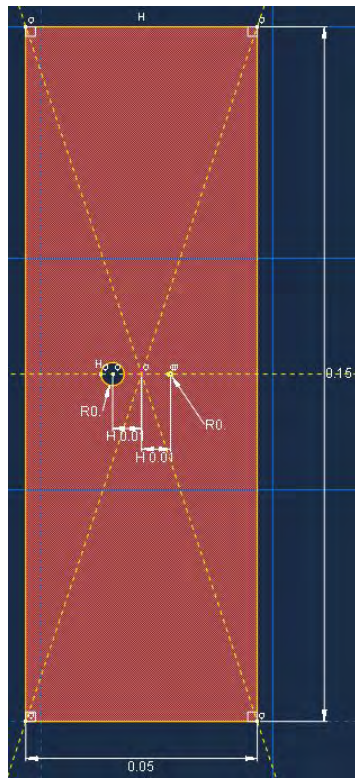
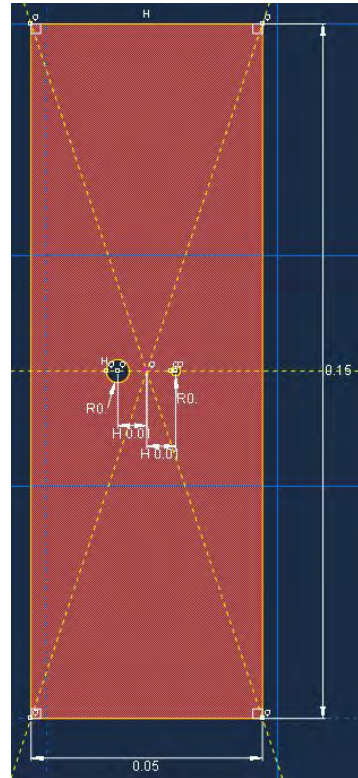
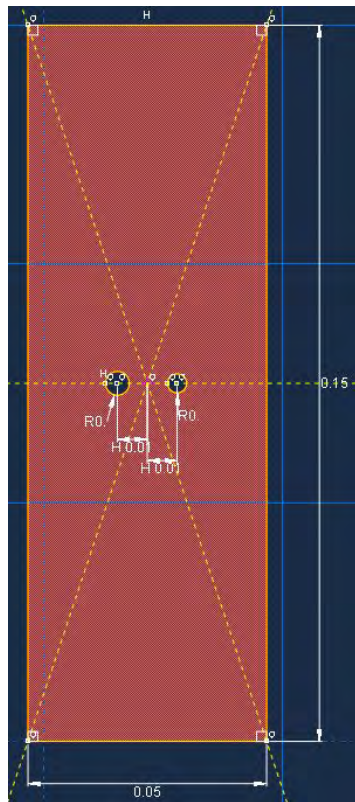
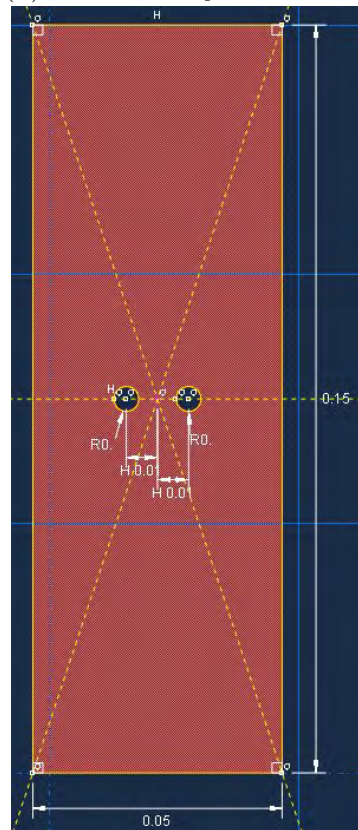
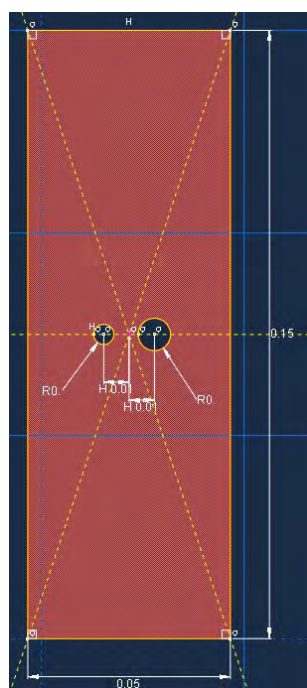
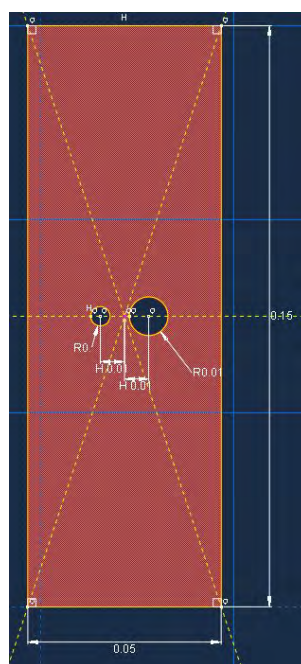
(a) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 1mm$ (b) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 2mm$ (c) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 4mm$ (d) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 5mm$

Figura 10.1: Placas dos agujeros en dirección diagonal, diferentes tamaños de agujero

(a) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 8mm$ (b) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 10mm$ **Figura 10.2:** Placas dos agujeros en dirección diagonal, diferentes tamaños de agujero(a) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 1mm$ (b) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 2mm$ **Figura 10.3:** Placas dos agujeros en dirección longitudinal, diferentes tamaños de agujero

(a) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 4mm$ (b) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 5mm$ (c) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 8mm$ (d) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 10mm$ **Figura 10.4:** Placas dos agujeros en dirección longitudinal, diferentes tamaños de agujero

(a) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 1mm$ (b) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 2mm$ (c) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 4mm$ (d) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 5mm$ **Figura 10.5:** Placas dos agujeros en dirección longitudinal, diferentes tamaños de agujero

(a) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 8mm$ (b) $D_1 = 5mm$ y $D_2 = 10mm$ **Figura 10.6:** Placas dos agujeros en dirección longitudinal, diferentes tamaños de agujero

La configuración de la placa monoagujero con tamaño de agujero $D_1 = 5mm$ es la de la figura 6.3a en la página 39.

La tabla 10.1 recoge el número total de elementos de cada caso, con un tamaño de elemento alrededor de agujero de 0,00008 m.

| D_2 (mm) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 26736 | 43720 | 32987 | 45094 |
| 2 | 26736 | 45724 | 33859 | 44522 |
| 4 | 26736 | 33544 | 38949 | 47526 |
| 5 ¹ | 26736 | 36504 | 41009 | 49780 |
| 8 | 26736 | 43117 | 48129 | 49362 |
| 10 | 26736 | 47372 | 51225 | 52738 |

Tabla 10.1: Número de elementos para las diferentes configuraciones

Los resultados obtenidos de la concentración de tensiones a través del programa son los que figuran en la tabla 10.2 y la figura 10.7 .

¹Caso simétrico

| D_2 (mm) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 2,96698 | 2,99315 | 2,96075 | 2,95703 |
| 2 | 2,96698 | 3,01209 | 2,93589 | 2,99463 |
| 4 | 2,96698 | 3,13182 | 2,83702 | 3,02173 |
| 5 | 2,96698 | 3,16901 | 2,76352 | 3,04363 |
| 8 | 2,96698 | 3,47835 | 2,93080 | 3,18751 |
| 10 | 2,96698 | 3,74377 | 3,04771 | 3,36192 |

Tabla 10.2: Concentración de tensiones para las diferentes configuraciones

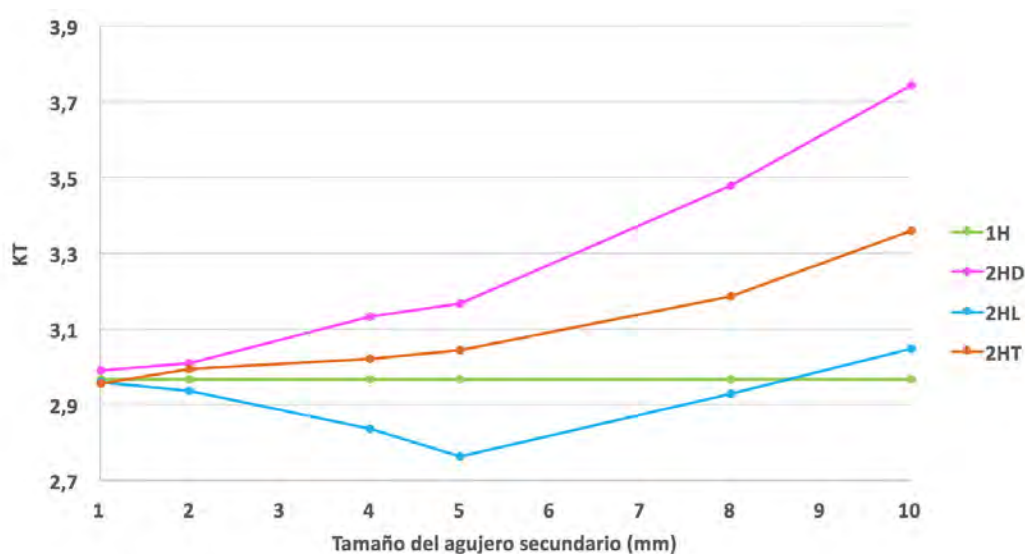


Figura 10.7: Concentración de tensiones para las diferentes configuraciones

Gracias a esta verificación se puede observar el comportamiento que muestran las placas ante una variación en su geometría para el factor de concentración de tensiones.

A simple vista se observa que la no simetría de agujeros, tiene consecuencias diferentes o similares según la disposición de agujeros que haya. Aumentando en dos configuraciones el KT, mientras que en el tercero caso el KT disminuye para luego aumentar.

La configuración 2HD, por el contrario cuenta con una forma similar a la forma de una función exponencial. La gráfica muestra como para los progresivos aumentos de D_2 hay un factor de entre 1 a 1,10 veces el valor anterior de concentración. Se puede ser que el factor es mucho mayor para los casos en los que $D_2 > D_1$ que en los casos en los que $D_2 < D_1$. En esta configuración se tiene un aumento de la variable KT para todas las variantes. El KT de la configuración de 2HD es entre 1,01 y 1,26 veces el de una configuración monoagujero, siendo más próximo el valor de la contracción a la de la configuración de un solo agujero cuando D_2 es

más pequeño. Además, se ve con claridad que esta configuración para cualquiera de sus variaciones cuenta con las mayores KT. Además, para esta configuración concreta y concretamente en sus variaciones $D_2 = 4, 8 \text{ y } 10 \text{ mm}$ el punto de mayor tensión de la placa se sitúa en el borde de agujero con menos diámetro².

Para la configuración 2HL se tiene en el inicio una disminución en el valor de la variable y una remontada final del valor de esta, aun así, llegando a superar el valor inicial para un $D_2 = 1 \text{ mm}$. En el rango de decrecimiento de la variable, para cada aumento de D_2 , el KT correspondiente, se vuelve un valor medio de 0,98 veces el valor anterior. Mientras que en la zona de crecimiento el factor es de 1,05. Además, hay que destacar que el valor más pequeño del KT se obtiene para el caso simétrico y el mayor el caso de $D_2 = 10 \text{ mm}$, que es un ratio entre diámetros de 2. Por otro lado, se ve que esta configuración, para todas sus casos, disminuye el valor de concentración de tensiones respecto al caso de monoagujero, el factor que tienen se encuentra en un rango de 0,93 a 1, a excepción del caso $D_2 = 10 \text{ mm}$ en el que el valor es de 1,03 veces el KT de la configuración de 1H.

Finalmente la configuración 2HT cuenta con una forma similar a la gráfica de la configuración de placa 2HD. En este caso, cada vez que la variable D_2 aumenta el factor que tenemos está comprendido entre 1,01 y 1,05 veces el valor de KT anterior, al igual que en el caso de 2HD cuanto mayor es D_2 mayor es este factor. Por otra parte, el valor que se tiene para la concentración de tensiones de esta configuración frente a la configuración base, de un agujero, es mayor para todos los casos, con la excepción de $D_2 = 1 \text{ mm}$, con un factor que va desde 1,01 para $D_2 = 2 \text{ mm}$ hasta 1,13 de la variación $D_2 = 10 \text{ mm}$. La excepción tiene un factor 0,997 veces el KT de la configuración del caso 1H.

Si se recoge en una gráfica los valores de la concentración de tensiones frente al coeficiente $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}}$ obtenemos la gráfica de la figura 10.8. En ella queda claro que para cualquier configuración de placa, 1H, 2HD, 2HL o 2HT, el KT toma un valor máximo cuando el coeficiente $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}}$ tiene un valor de 2. Por otro lado, en las tres configuraciones biagujero cuando el coeficiente $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}}$ toma el valor de 5 el valor de KT tiende al valor de la concentración de las tensiones de 1H. En los dos de los tres casos biagujeros, 2HD y 2HT, comienzan con un descenso de la variable KT entre $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}} = 1$ y $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}} = 1,25$, para a continuación en el rango de 1,25 a 2 aumentar mientras que a partir de 2, de nuevo, vuelve a decaer su valor de KT. Sin embargo, para 2HL el rango de crecimiento de KT va desde 1 a 2, luego de 2 a 2,5 disminuye y finalmente remonta hasta aproximarse al valor de KT del caso monoagujero. La concentración de tensiones tiene los valores mínimos para la configuración 2HL con valores de $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}}$ menores a 1,07 y 2HT con valores de $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}}$ mayores a 4,4.

²En la actualidad hay algunos estudios enfocados a la introducción de un segundo agujero de menor tamaño que reduzca el KT en el agujero principal.

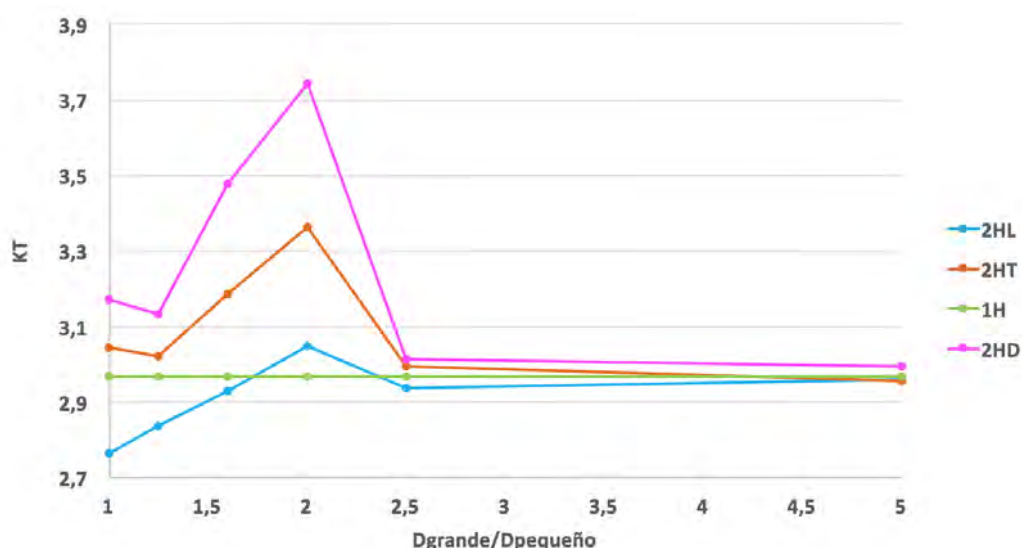


Figura 10.8: Concentración de tensiones para el coeficiente $D_{grande}/D_{pequeño}$

Los resultados obtenidos a través del programa para la variable de la rigidez en el plano en dirección de la carga, eje Y, son los que refleja en la tabla 10.3 y la figura 10.9 .

| D_2 (mm) | 1H | 2HD | 2HL | 2HT |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 31,34 | 31,20 | 31,33 | 31,16 |
| 2 | 31,34 | 31,19 | 31,31 | 31,15 |
| 4 | 31,34 | 31,12 | 31,21 | 31,11 |
| 5 | 31,34 | 31,06 | 31,14 | 31,09 |
| 8 | 31,34 | 30,43 | 30,80 | 30,38 |
| 10 | 31,34 | 29,95 | 30,47 | 29,72 |

Tabla 10.3: Rigidez en el plano en dirección de la carga para las diferentes configuraciones (GPa)

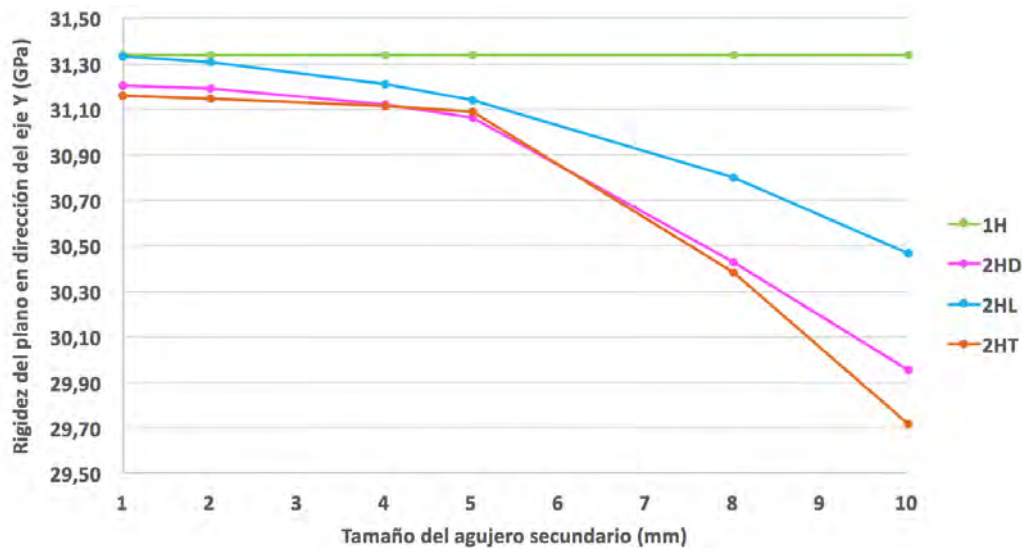


Figura 10.9: Rigidez en el plano en dirección de la carga para las diferentes configuraciones

Como muestran los datos obtenidos, la variación entre los diferentes valores de la rigidez para una misma configuración no son despreciables. Se ve una tendencia de los tres casos biagujero a disminuir el valor de la rigidez a medida que el tamaño del agujero D_2 aumenta. En las tres configuraciones el valor medio de la rigidez es de 31,26 GPa para las variaciones con $D_2 = 1\text{mm}$. Vemos que el caso de dos agujeros en posición transversal cuenta con los valores de rigidez más pequeños al aumentar el valor de D_2 . Como curiosidad la variación de 2HL con $D_2 = 1\text{mm}$ la rigidez es la misma que en el caso de monoagujero. Por otro lado las placas con configuración biagujero sufren una disminución de la rigidez frente al caso 1H, siendo un valor medio de 0,99 veces el valor del caso monoagujero.

Si se recoge en una gráfica los valores de la rigidez en el plano en dirección del eje Y frente al coeficiente $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}}$ obtenemos la gráfica de la figura 10.10. En ella queda claro que para cualquier configuración de placa, 1H, 2HD, 2HL o 2HT, la rigidez toma un valor mínimo cuando el coeficiente $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}}$ es 2, el cual es el mismo valor para el cual se obtiene el mayor valor de KT. Si enfrentamos la gráfica de la figura 10.8 y la gráfica de la figura 10.10 son simétricas de forma. Por otro lado, en las tres configuraciones biagujero cuando el coeficiente $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}}$ toma el valor de 2,5 a 5 el valor de la rigidez es prácticamente constante. Por otro lado, en los tres casos biagujeros, comienzan con un aumento de la rigidez entre $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}} = 1$ y $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}} = 1,25$, para a continuación en el rango de 1,25 a 2 disminuir mientras que a partir de 2, de nuevo, vuelve a aumentar su valor de rigidez. La rigidez del plano tiene los valores mínimos para la configuración 2HT con valores de $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}}$ mayores a 1,4. Curiosamente el valor de la rigidez de la variación de $D_{\text{grande}}/D_{\text{pequeño}} = 5$ de 2HL es igual que en valor de la configuración monoagujero.

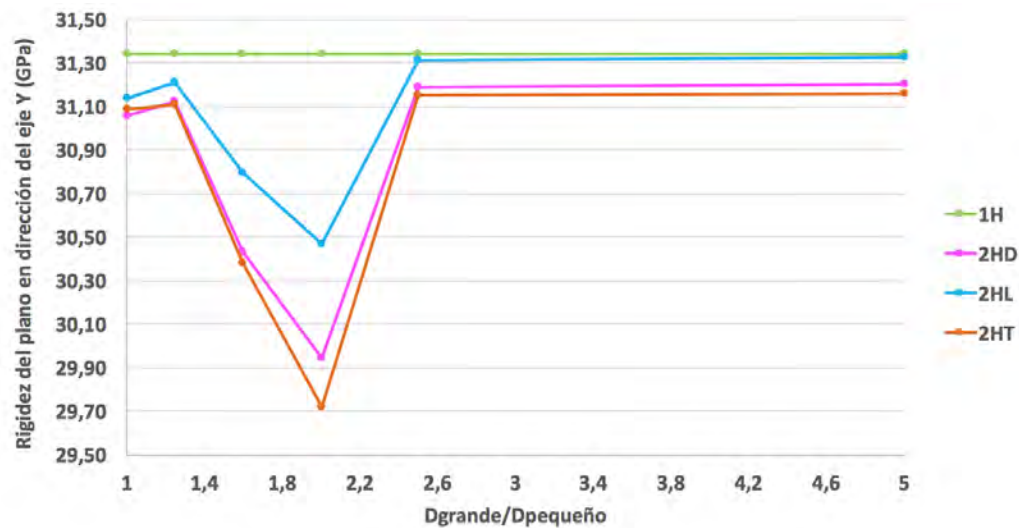


Figura 10.10: Rigidez en el plano en dirección de la carga para las diferentes configuraciones

Se puede resumir diciendo que si se busca una placa con baja concentración de tensiones se deberá recurrir a una configuración 2HL evitando la simetría o con un $D_{grande}/D_{pequeño} > 4,8$. Por el contrario si lo buscado es una placa con alta rigidez se deberá recurrir a una placa monoagujero o si un segundo agujero es necesario, la mejor opción, es de nuevo, 2HL con la mayor diferencia entre el tamaño de diámetro de los agujeros.

Capítulo 11

Presupuesto

A continuación se presenta una relación detallado del presupuesto inicial destinado al proyecto y el coste final del mismo.

11.1. Datos

- Autor: María Aransáez Ortega
- Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras.

11.2. Descripción del proyecto

- Título: EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS EN PLACAS DE TIPO LAMINADO CON AGUJEROS
- Duración (meses): 10
- Tasa de costes Indirectos: 20

11.3. Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):

6.000 €

11.4. Desglose presupuestario (costes directos)

| Nombre | Ocupación | Dedicación (hombres mes) ¹ | Coste (hombre mes) | Coste (€) | Firma de conformidad |
|-----------------|--------------------------|--|-----------------------|--------------|-------------------------|
| Enrique Barbero | Catedrático | 1 | 4.289,54 | 4.289,54 | |
| María Aransáez | Estudiante de ingeniería | 5,49 | 0,00 | 0,00 | |
| Hombres mes | | 6,49 | Total | 4.289,54 | |

Tabla 11.1: Personal

| Descripción | Coste (€) | % Uso dedicado proyecto | Dedicación (meses) | Periodo de depreciación | Coste imputable |
|--------------------------------------|--------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------|
| Ordenador personal | 600,00 | 10 | 4 | 60 | 4,39 |
| Licencia de Abaqus 6.14 ² | 0,00 | 100 | 3 | 60 | 0,00 |
| Licencia de Excel ³ | 0,00 | 10 | 3 | 60 | 0,00 |
| Licencia de LaTeX ⁴ | 0,00 | 90 | 1 | 60 | 0,00 |
| Total | | | | | 4,39 |

Tabla 11.2: Equipos

Mediante la fórmula 11.1 se calcula la columna de *Coste imputable* de la tabla 11.2.

Fórmula de cálculo de la Amortización:

$$\frac{A}{B} \cdot C \cdot D \quad (11.1)$$

Donde:

- A = número de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado.
- B = periodo de depreciación (60 meses).
- C = coste del equipo (sin IVA).
- D = % del uso que se dedica al proyecto.

¹ 1 Hombre mes = 131,25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas)
Máximo anual para PDI de la Universidad Carlos III de Madrid de 8,8 hombres mes (1.155 horas)

² Licencia académica perteneciente a la UC3M

³ Licencia regalada por Microsoft Office a los alumnos de la UC3M

⁴ Licencia libre

11.5. Resumen de costes

| Presupuesto Costes Totales | Presupuesto Costes Totales |
|----------------------------|----------------------------|
| Personal | 4.290 |
| Amortización | 4 |
| Subcontratación de tareas | 0 |
| Costes de funcionamiento | 0 |
| Costes Indirectos | 859 |
| Total | 5.153 € |

Tabla 11.3: Resumen de costes

Formato obtenido de la página web de la Universidad Carlos III de Madrid.[25]

Conclusión y trabajos futuros

12.1. Resumen y conclusiones

Durante la realización y posterior análisis de todos los casos que este proyecto ha conllevado, se ha podido llegar a una serie de conclusiones a cerca de como estas variaciones en la placa, afectan sobre las variables de estudio escogidas.

Centrándose en el factor de concentración de tensiones, se puede ver que no todas las variaciones la repercuten sobre su valor. Se muestra con claridad, que la variación del la secuencia del apilamiento, no tiene ninguna transcendencia. Al igual, si se varía el material de composición o una de las propiedades elásticas de este, el KT no sufre una variación significativa. Por el contrario si la variación sobre la propiedad se hace en un laminado uni-direccional, se recoge un aumento del factor de la concentración de tensiones a medida que el valor de la propiedad aumenta, siguiendo la forma aproximada de una función exponencial. Por otro lado, si es variado el apilamiento completamente, variando las orientaciones y las agrupaciones, si se observa una variación de la variable KT. Siendo apreciable una relación entre el aumento del ángulo de las láminas diferentes a 0° y 90° , y la reducción del factor de la concentración de tensiones.

Por otro lado, se observa que al variar la distancia entre centros de agujero, siempre manteniendo la simetría, la concentración de tensiones se ve afectada. Sin embargo, crece o decrece según la posición relativa de los agujeros. Al igual, cuando la simetría geométrica de la placa es eliminada, mediante la variación del tamaño de uno de los agujeros la variable KT se ve afectada. Así como en el caso de la separación de agujeros, dependiendo de la configuración de placa que se tenga el factor KT aumenta o disminuye.

Así se puede colegir que si el objetivo es tener la menor concentración de tensiones posible, esta se encuentra en el caso de la configuración de placa con dos agujeros en posición longitudinal y para placa realizadas con materiales que cuenten con las propiedades de valor más bajo posible.

Respecto a la rigidez del plano en dirección del eje de carga (el cual en este proyecto

ha sido el eje Y), se ve alterada por casi todos los casos que hay en el estudio, siendo las excepciones el caso de la variación de la distancia entre agujeros y la variación de la secuencia del laminado. La rigidez crece con el aumento de los valores de las propiedades del materiales o en su defecto, con el aumento de solo una de ellas. De igual manera aumentará la rigidez del plano cuantas más láminas a 0° tenga el apilamiento, o menor sea los ángulos de las láminas diferentes de 0° o 90° . Por el contrario, la rigidez disminuye a medida que en una placa uno de los agujeros toma mayor tamaño.

En conclusión, si lo buscado es la mayor rigidez del plano en dirección del eje de carga, se necesitará materiales compuestos con valores de propiedades muy altas, que cuenten especialmente con un alto valor del módulo de elasticidad en sentido longitudinal (E_1). Además cuanto mayor sea el número de láminas con las fibras alineadas con el eje de carga (láminas a 0° en este proyecto) mayor rigidez se obtendrá. Finalmente, en el caso de tener que realizar un segundo agujero en la placa, la mejor opción y la cual disminuye en menor medida la rigidez, respecto al caso de un solo agujero, es la configuración denominada 2HL.

12.2. Trabajos futuros

Tras la completar todos los subproyectos de este trabajo, quedan en el tintero ciertas variaciones más que se podrían realizar. Estas variaciones no serían solo del índole geométrico o de materiales, sino que se podrían introducir variaciones en las condiciones de contorno y carga. Estos nuevos casos proporcionarían una perspectiva más amplia del efecto de los agujeros en las placas de tipo laminado.

Aun así, el primer trabajo futuro a realizar sería en laboratorio. La posibilidad de reproducir físicamente todos los casos realizados durante el proyecto, darían una mayor autoridad a los resultados de la simulación, siempre que estos coincidieran o contasen con un error mínimo.

Tras validar mediante el laboratorio que la simulación es correcta. Se podrían realizar diferentes variaciones del proyecto. Se comenzaría con la variación de la carga aplicada en el plano de la placa, ya que este estudio está realizado en su totalidad, con cargas de compresión y no se puede asegurar que el comportamiento de la placa frente a cargas de tracción o cortadura sean el mismo que queda reflejado en el proyecto.

En la misma línea, a continuación se debería aumentar el número agujeros por placa. Esto se debe a que no se puede ratificar que la introducción de un tercer o cuarto agujero mantuviera las variaciones en la concentración de tensiones y en la rigidez que se obtienen para dos agujeros.

Para terminar, sería recomendable reproducir el total de los casos en un modelo numérico en tres dimensiones. Este proyecto al estar en realizado en 2D, las tensiones en dirección del eje Z, al igual que los giros que la placa pueda

experimental se limitan o directamente se desprecian. Este trabajo no se a podido realizar directamente en 3D, por cuestiones técnicas. Ya que la licencia de Abaqus que se tiene, no cuenta con un número suficiente de elementos, como para poder correr un caso de estas dimensiones con una placa realizada como sólido. Además, un modelo 3D requeriría la creación de una subrutina, ya que Abaqus no cuenta con lo necesario implementado en el código de serie para poder realizar el trabajo.

Bibliografía

Libros

- [23] Kollár, P. László y George S. Springer. *Mechanics of composite structures*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. ISBN: 978-0521126908.

Artículos

- [1] Sourabh Khedkar y col. «Progressive failure analysis of CFRP laminate with interacting holes under compressive loading». En: *Journal of Composite Materials* 49.26 (2015), págs. 3263-3283.
- [2] MA Caminero y col. «Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation». En: *Composites Part B: Engineering* 53 (2013), págs. 76-91.
- [5] C. Soutis, P.T. Curtis y N.A. Fleck. «Compressive failure of notched carbon fibre composites». En: 440.1909 (1993), págs. 241-256.
- [6] P.P. Camanho y col. «A finite fracture mechanics model for the prediction of the open-hole strength of composite laminates». En: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43.8 (2012), págs. 1219-1225.
- [7] V Kamala Kannan y col. «Tension and compression strength evaluation of composite plates with circular holes». En: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 29.10 (2010), págs. 1500-1514.
- [8] MR Wisnom, SR Hallett y C Soutis. «Scaling effects in notched composites». En: *Journal of Composite Materials* 44.2 (2010), págs. 195-210.
- [9] Alfredo Balacó de Morais. «Open-hole tensile strength of quasi-isotropic laminates». En: *Composites Science and Technology* 60.10 (2000), págs. 1997-2004.
- [10] C Soutis. «Compressive strength of composite laminates with an open hole: Effect of ply blocking». En: *Journal of Composite Materials* 47.20-21 (2013), págs. 2503-2512.
- [11] Kambiz Bakhshandeh, Iraj Rajabi y Farhad Rahimi. «Investigation of stress concentration factor for finite-width orthotropic rectangular plates with a circular opening using three-dimensional finite element model». En: *Strojniški Vestnik* 54.2 (2008), pág. 140.

- [14] David Taylor. «Analysis of fatigue failures in components using the theory of critical distances». En: *Engineering Failure Analysis* 12.6 (2005), págs. 906-914.
- [15] C. Soutis y N.A. Fleck. «Static compression failure of carbon fibre T800/924C composite plate with a single hole». En: *Journal of Composite Materials* 24.5 (1990), págs. 536-558.
- [16] C. Soutis y E.C. Edge. «A method for the production of carpet plots for notched compression strength of carbon fibre reinforced plastic multidirectional laminates». En: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 211.4 (1997), págs. 251-261.
- [17] P Berbinau y col. «Effect of off-axis ply orientation on 0-fibre microbuckling». En: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 30.10 (1999), págs. 1197-1207.
- [18] P Berbinau, C Soutis y IA Guz. «Compressive failure of 0 unidirectional carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP) laminates by fibre microbuckling». En: *Composites Science and technology* 59.9 (1999), págs. 1451-1455.
- [19] BY Chen y col. «Numerical analysis of size effects on open-hole tensile composite laminates». En: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 47 (2013), págs. 52-62.
- [20] J Lee y C Soutis. «Measuring the notched compressive strength of composite laminates: specimen size effects». En: *Composites Science and Technology* 68.12 (2008), págs. 2359-2366.

Páginas webs

- [3] Biciscope. *LA FIBRA DE CARBONO Y SUS VENTAJAS PARA TU BICICLETA*. [La página fue visitada durante septiembre del 2017]. URL: <https://www.biciscope.com/las-ventajas-la-fibra-carbono-bicicleta/>.
- [4] Airbus. *A wing that adapts*. [La página fue visitada durante septiembre del 2017]. URL: <http://www.a350xwb.com/innovation/>.
- [13] Zhigang Suo. *Sergei Georgievich Lekhnitskii*. [La página fue visitada durante septiembre del 2017]. URL: <http://imechanica.org/node/1494>.
- [21] Canal de Youtube: Alta Densidad. *Así prueban la resistencia de las alas en aviones comerciales*. [La página fue visitada durante septiembre del 2017]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=JbZe4NGi9vs>.
- [22] Simulia. *Abaqus 6.14 Analysis users manual and documentation*. [Página visitada durante el mes de marzo de 2017]. URL: <http://50.16.225.63/v6.14/>.
- [25] Universidad Carlos III de Madrid. *PROYECTO FIN DE CARRERA*. [La página fue visitada durante agosto y septiembre de 2017]. URL: <https://www.uc3m.es/ss/Satellite/SecretariaVirtual/esp/TextoMixta/1371218569460/#presentacionydefensa>.

Otras fuentes

- [24] Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras.
Apuntes de Mecánica de materiales compuestos. 2016-17.

